Az LHC újabb eredményei

Pásztor Gabriella





Új Fizika?
Az ismeretlen nyomában a Nagy Hadronütköztetővel

Pásztor Gabriella

MTA – ELTE Lendület CMS Részecske- és Magfizikai Kutatócsoport

ELTE TTK Atomfizikai Tanszék

Budapest, 2016. november 12.

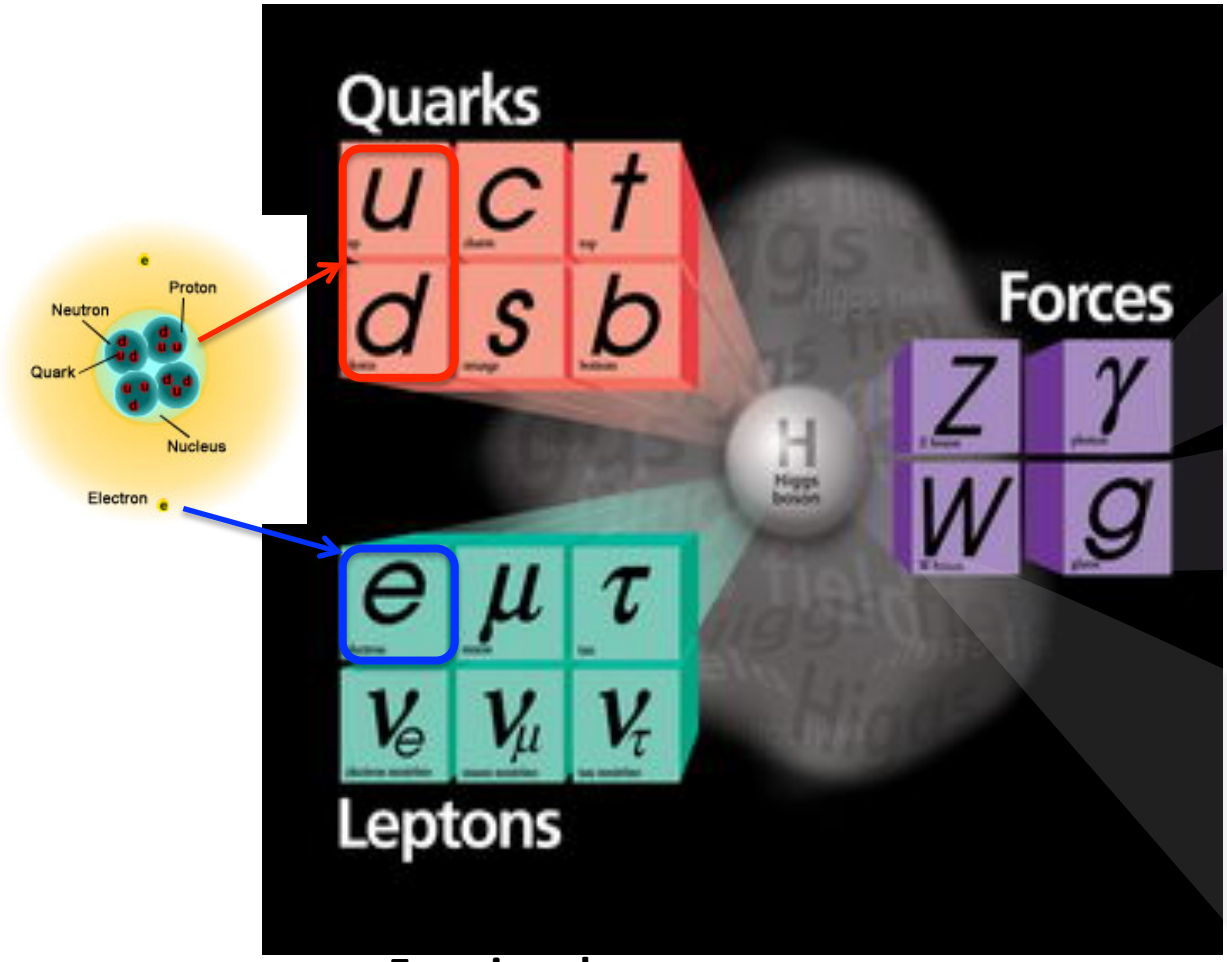
http://gpasztor.web.cern.ch/gpasztor/

E-mail: gpasztor@caesar.elte.hu



Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

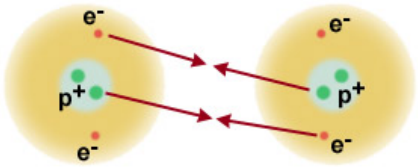
Az anyag építőkövei



Fermionok:
3 család

Kölcsönhatások közvetítői

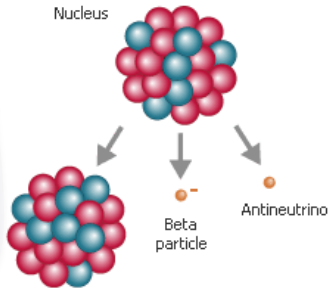
Elektromágneses



Erős



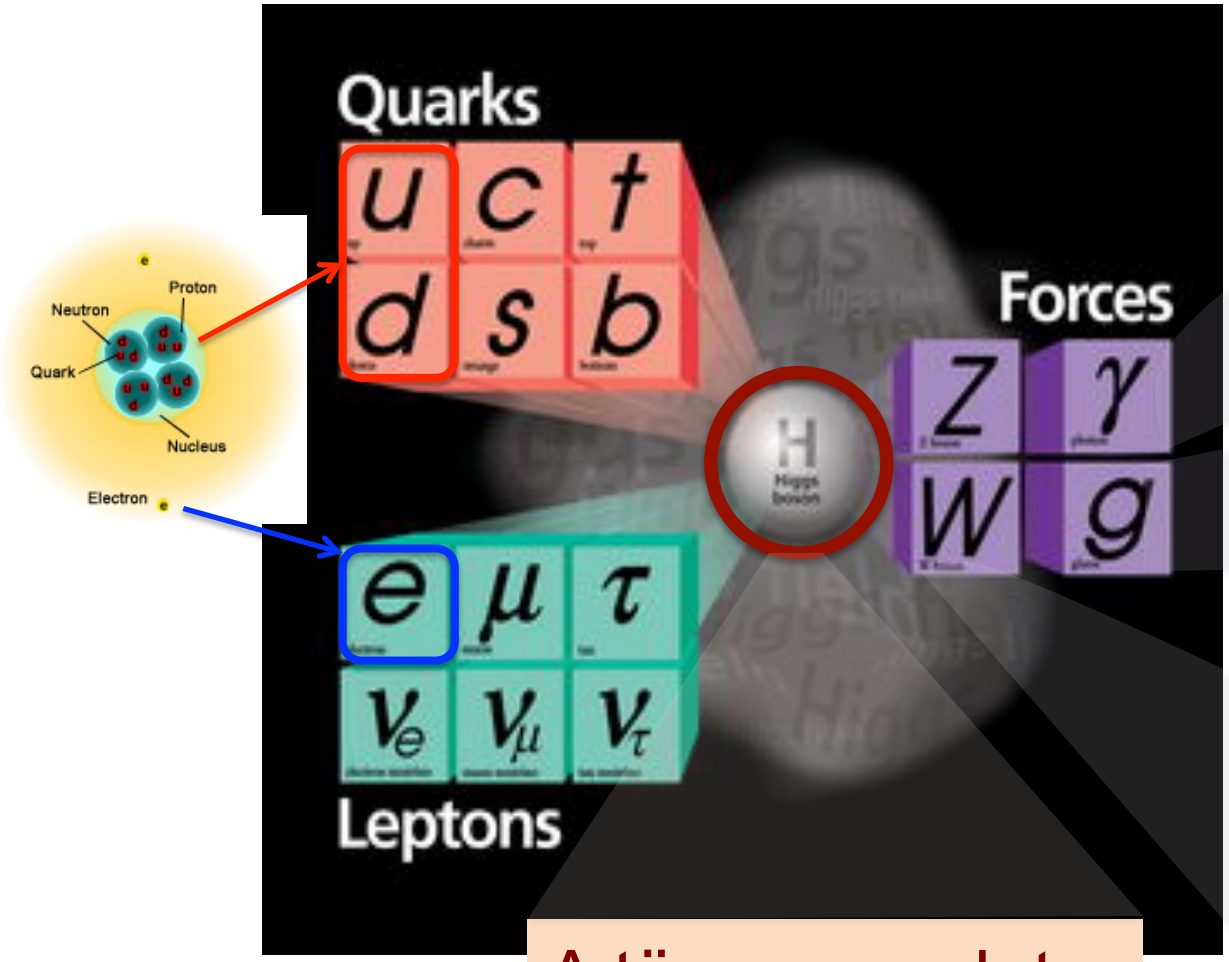
Gyenge



Bozonok

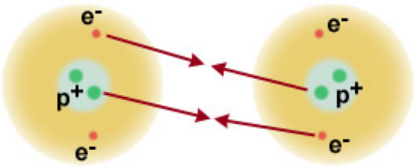
Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

Az anyag építőkövei



Kölcsönhatások közvetítői

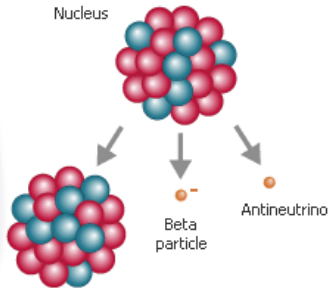
Elektromágneses



Erős

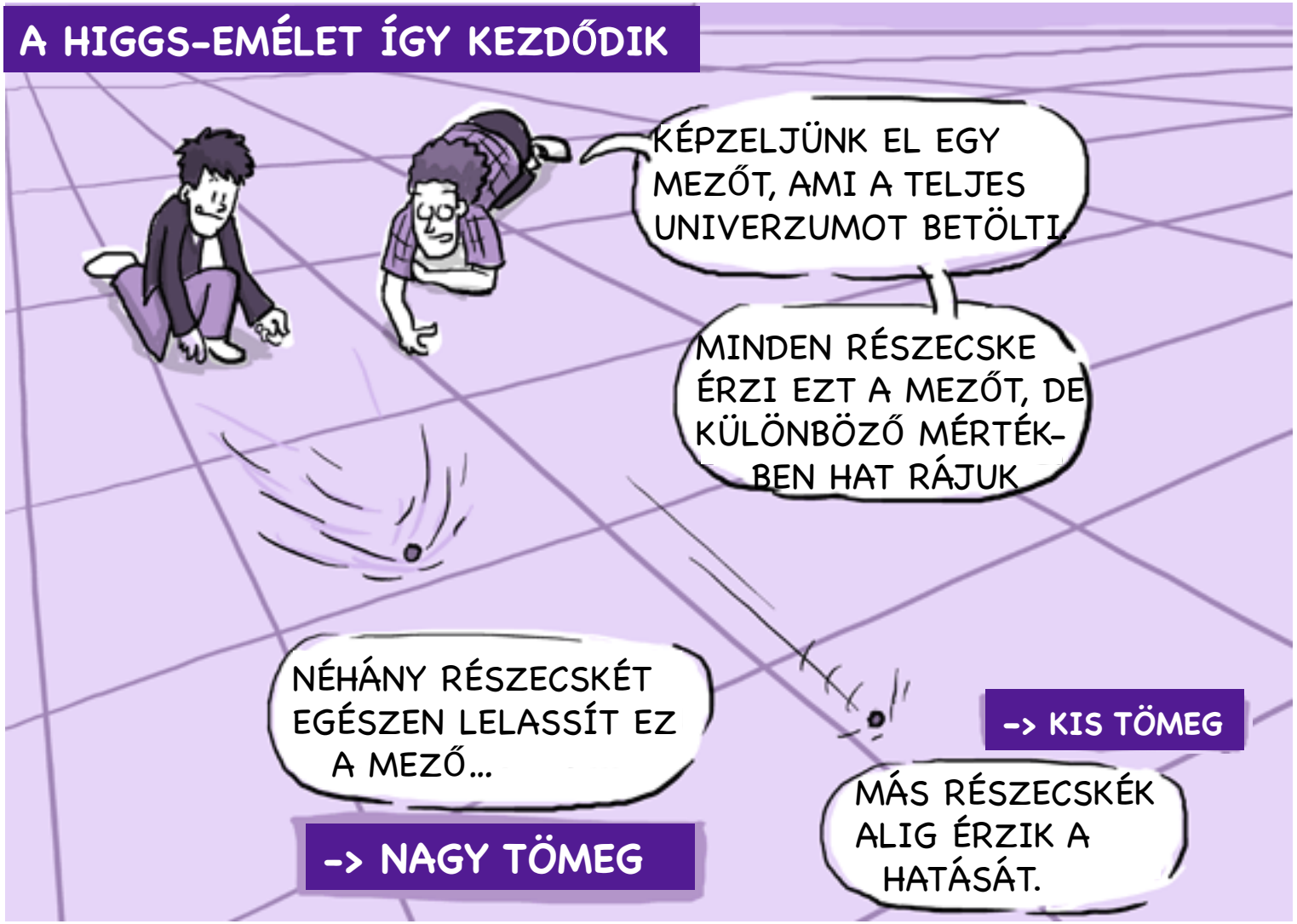


Gyenge



A tömeg eredete

A Higgs-tér és a tömeg



Higgs-bozon: a Higgs-mező gerjesztése, összecsomósodása

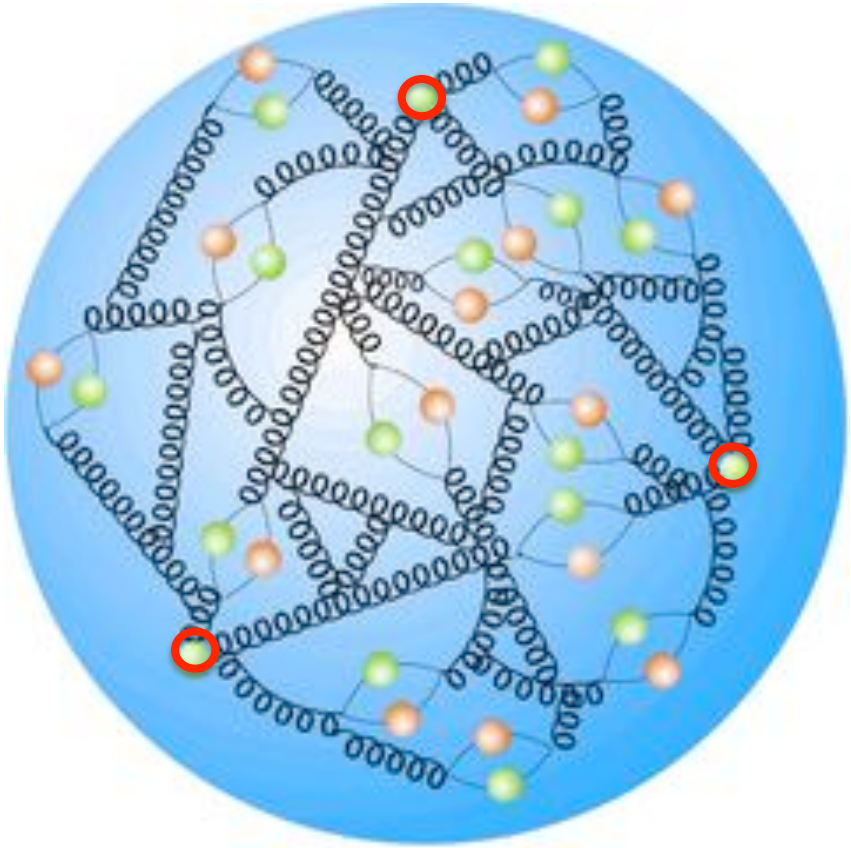
A Higgs-tér





Ha nem lenne Higgs-tér → az elektron tömege nulla lenne
→ nem képződhetnének stabil atomok
→ nem alakulhatna ki élet az Univerzumban

Kitérő: a proton szerkezete



- A kvarkok közti kölcsönhatást gluonok közvetítik
- A proton belsejében virtuális (igen rövidélettartamú, közvetlenül meg nem figyelhető) kvark-antikvark párok keletkeznek és semmisülnek meg, energiájukat a körülöttük lévő vákumtól kölcsönözve
- A protonba “zárt” elemi részecskék kinetikus energiája adja a proton tömegének 99%-át



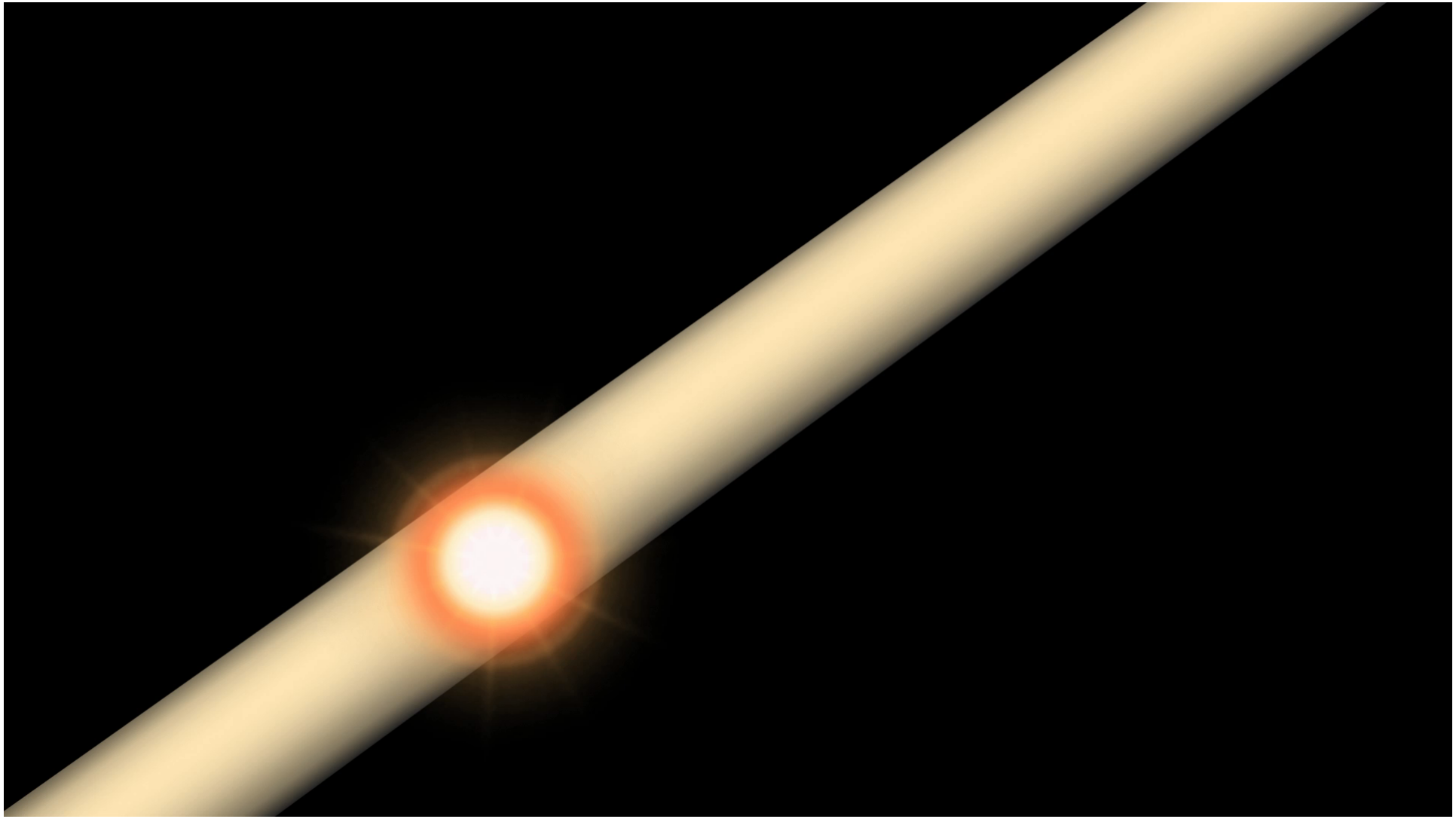




A 2013-as fizikai Nobel-díjat François Englert és Peter W. Higgs közösen nyerte el ”**Egy mechanizmus elméleti felfedezéséért, amely hozzájárul ahhoz, hogy megértsük a szubatomi részecskék tömegének az eredetét, és amelyet a közelmúltban megerősítettek a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél működő ATLAS és a CMS kísérletek a megjósolt elemi részecske felfedezésével.** ” (magán fordítás)

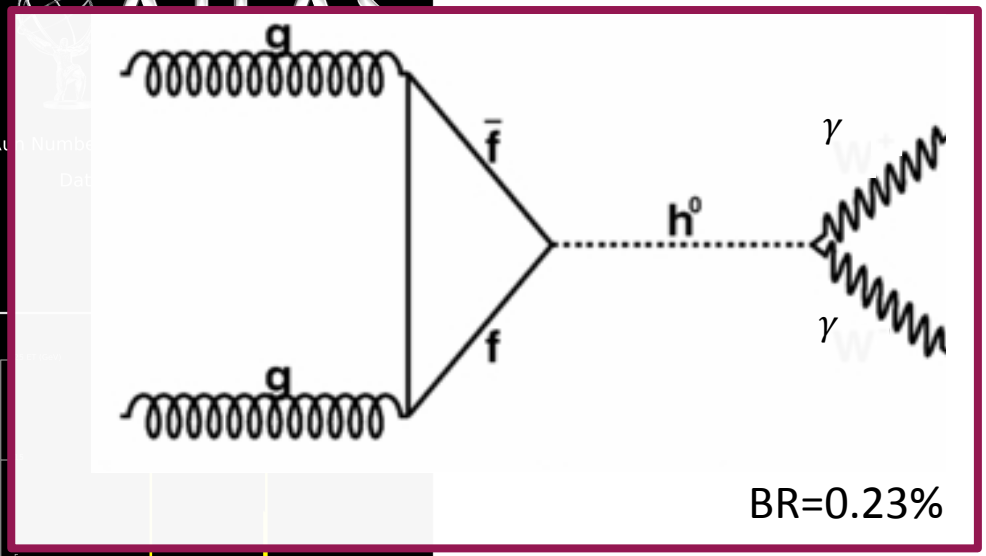
2013. október 8.

Nagyenergiás ütközések az LHC-ben avagy hogyan fedeztük fel a Higgs-bozont

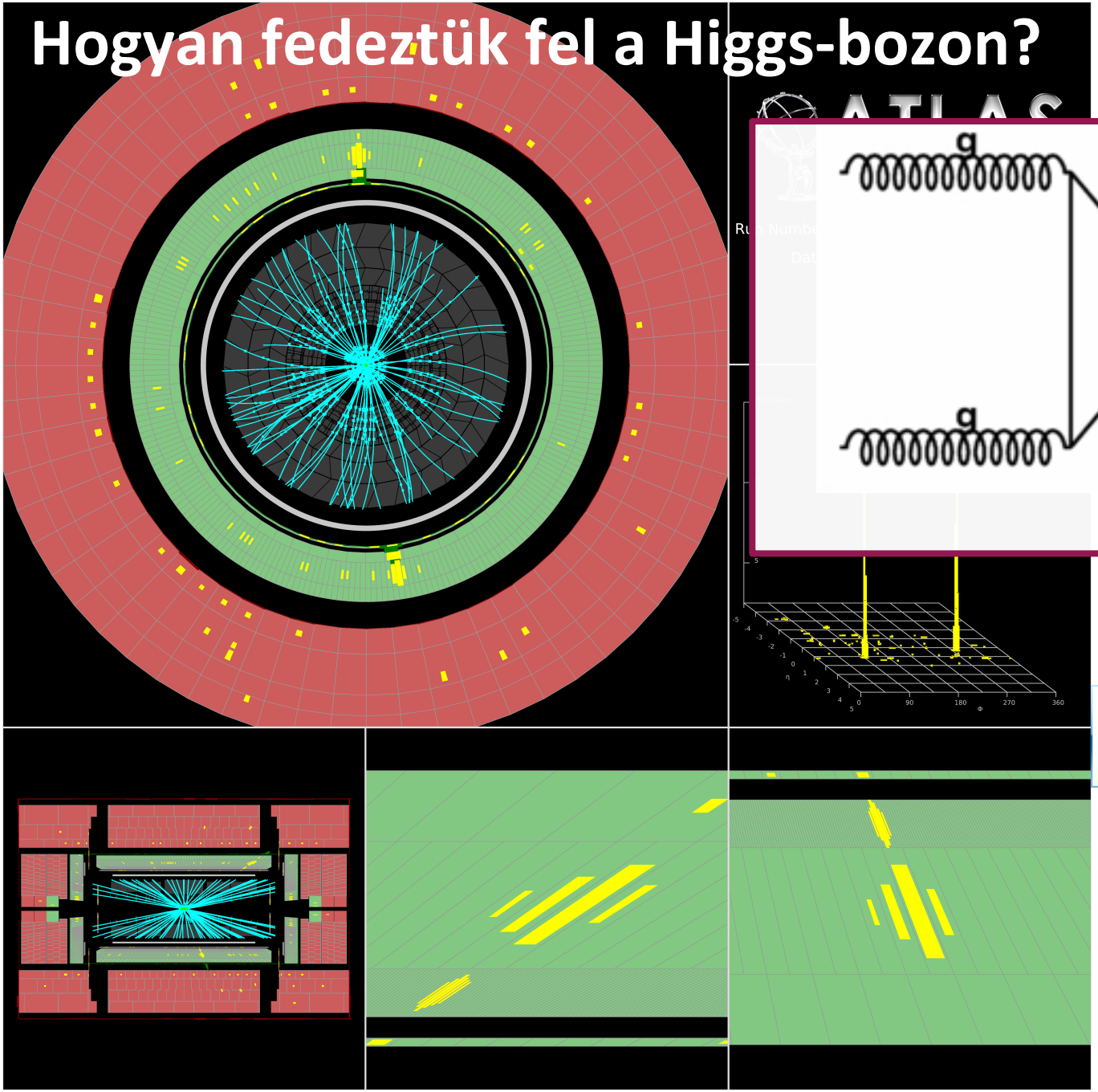


Hogyan fedeztük fel a Higgs-bozon?

$H \rightarrow \gamma\gamma$



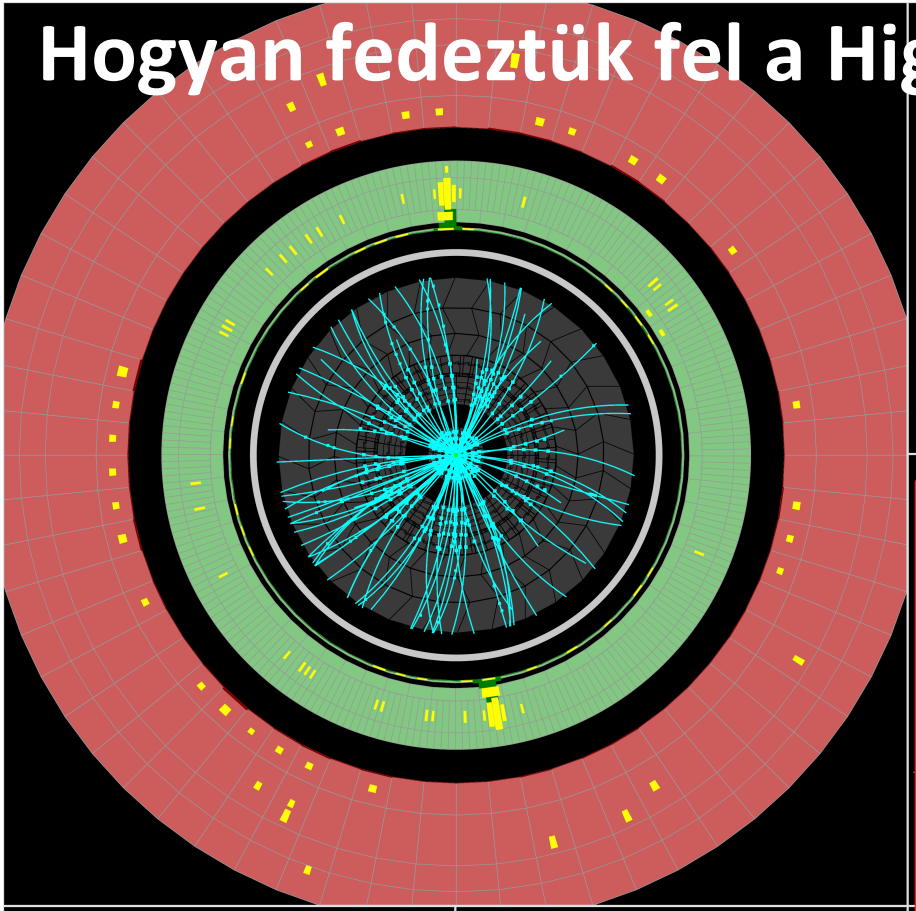
BR=0.23%

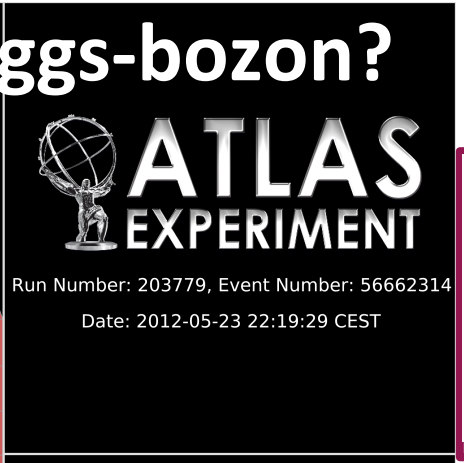


$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

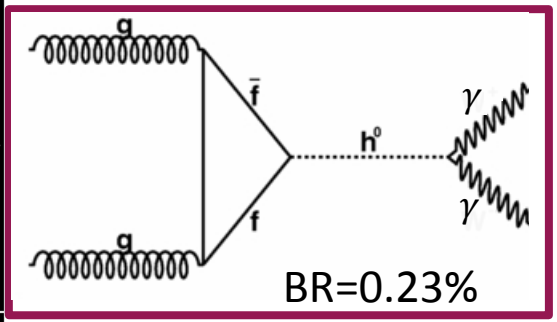
$$m^2 = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{E_i}{c^2}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\vec{p}_i}{c}\right)^2$$

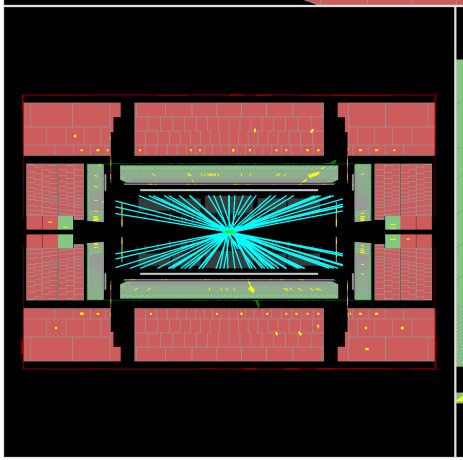
Hogyan fedeztük fel a Higgs-bozon?

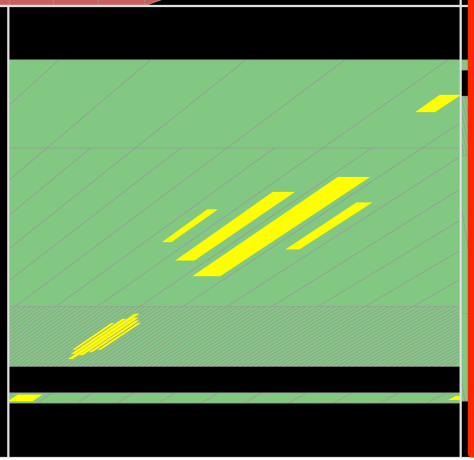


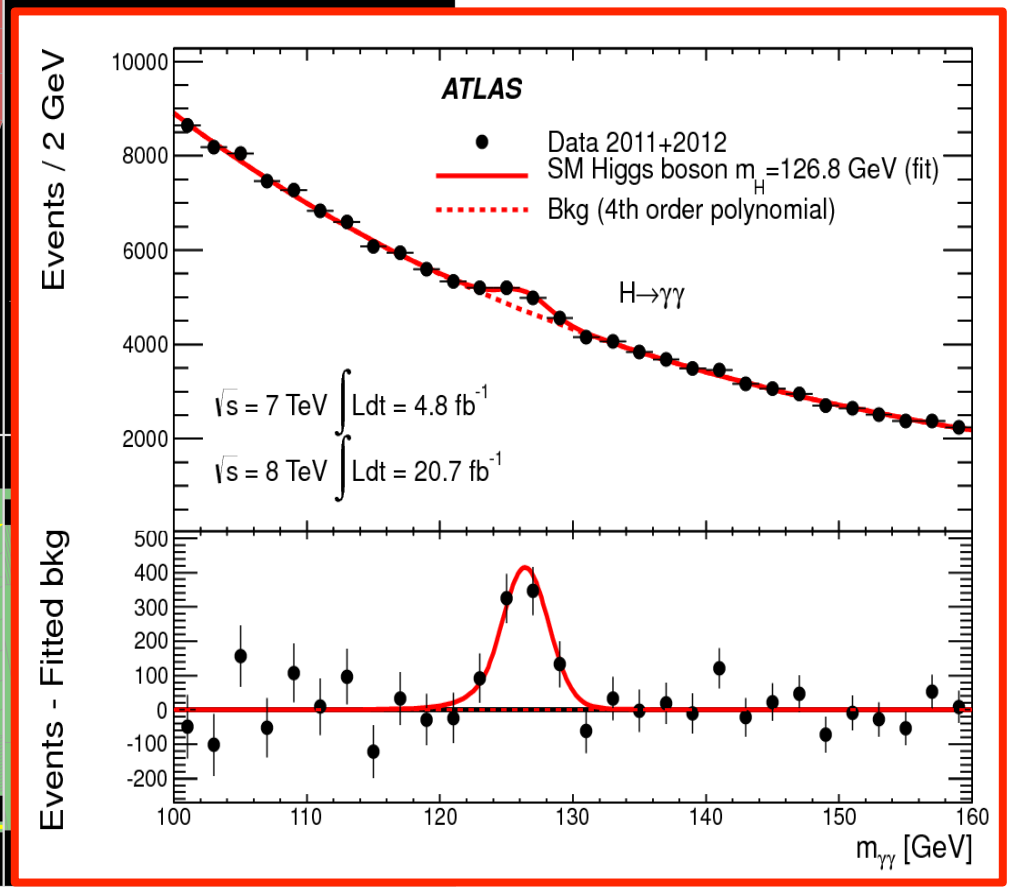


$H \rightarrow \gamma\gamma$

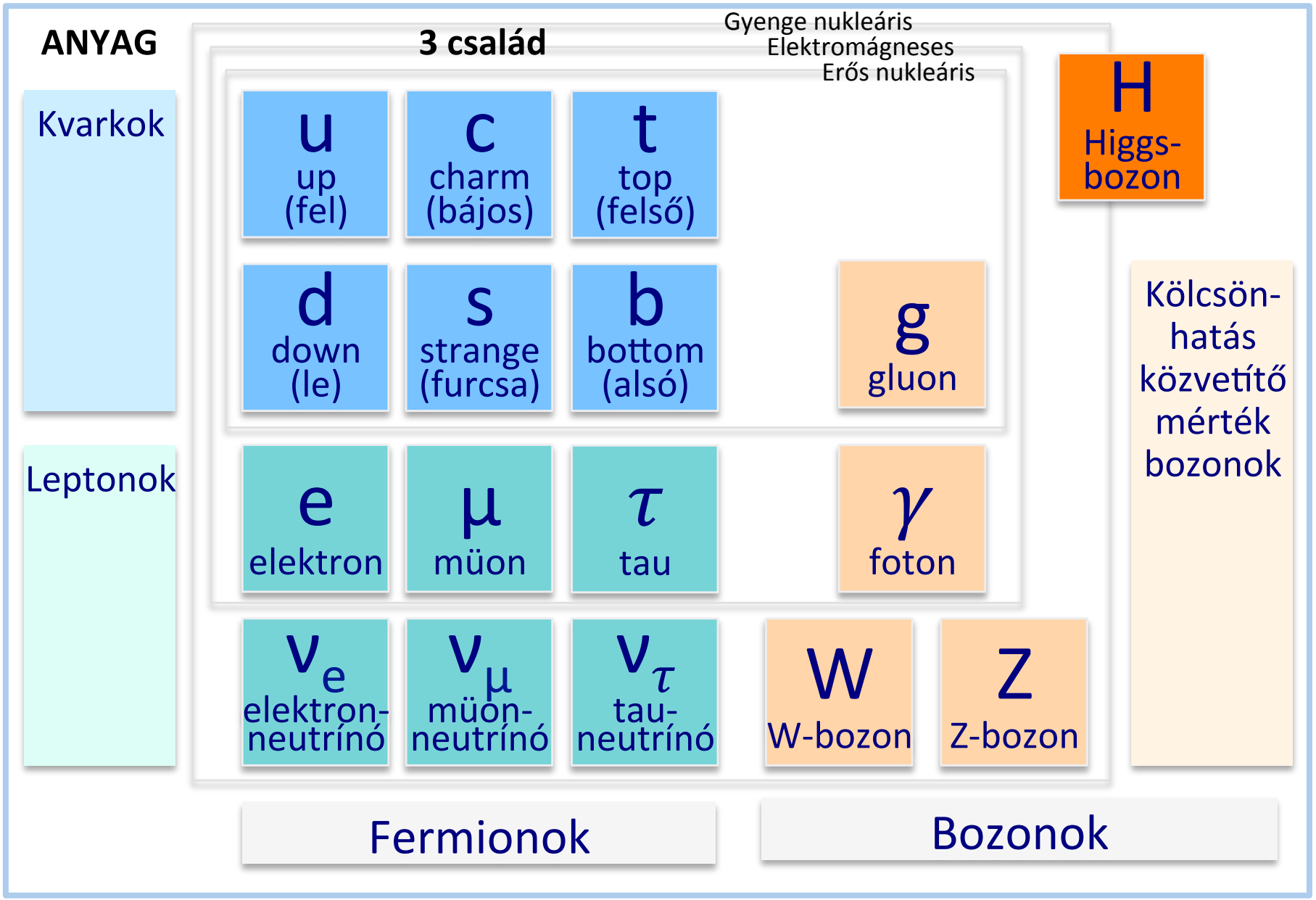






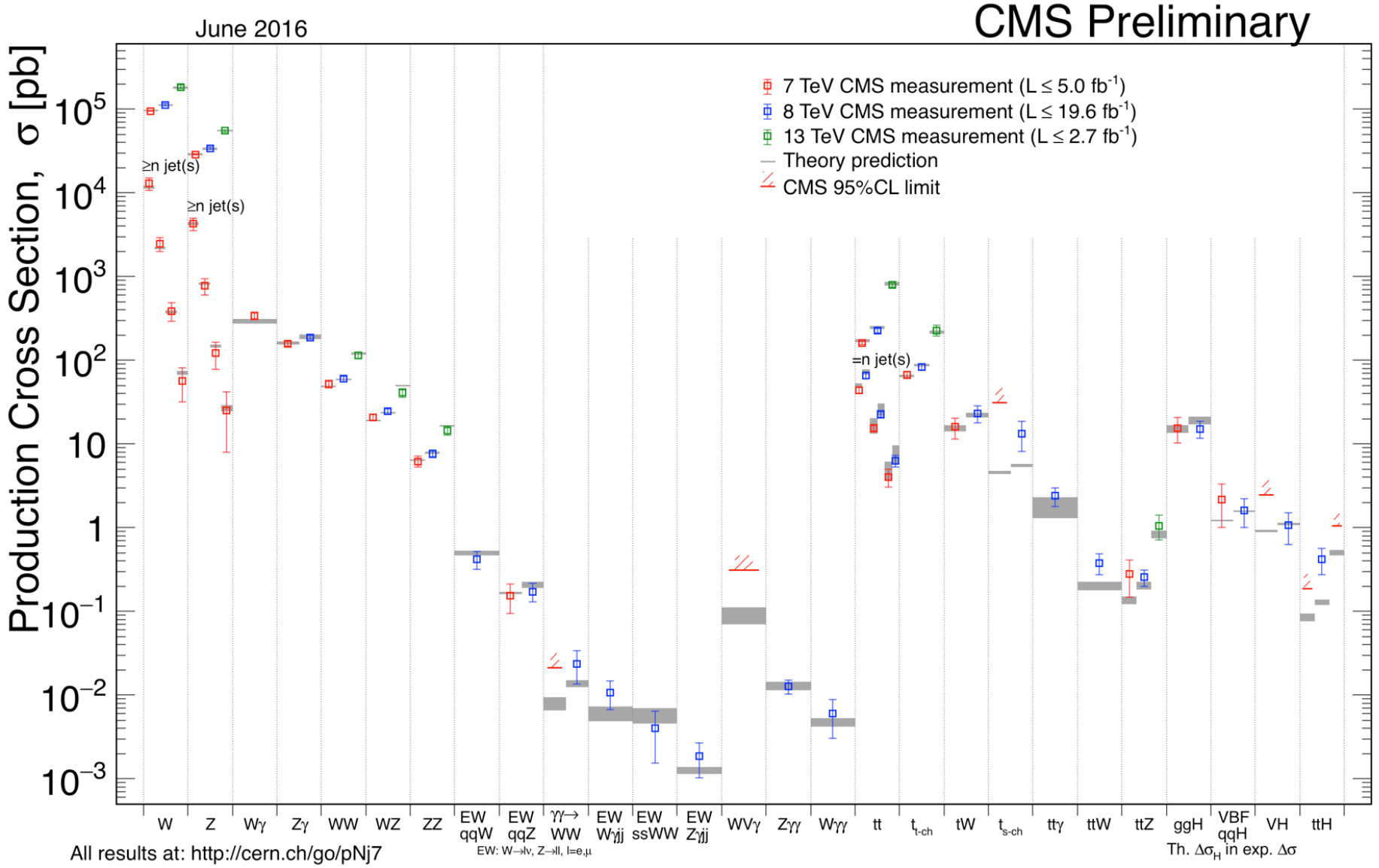


Elemi részecskék a Standard Modellben



A Standard Modell sikere

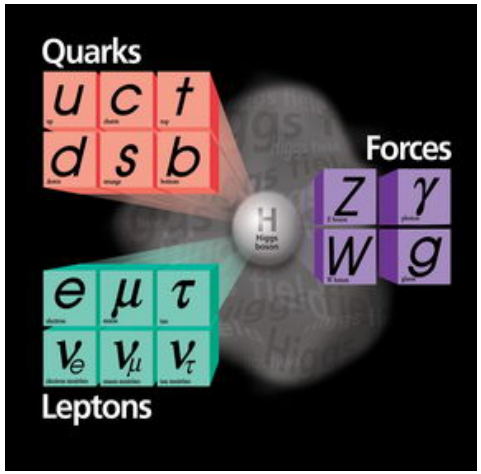
A pp → X folyamatok hatáskeresztmetszete (bekövetkezésének gyakorosága)

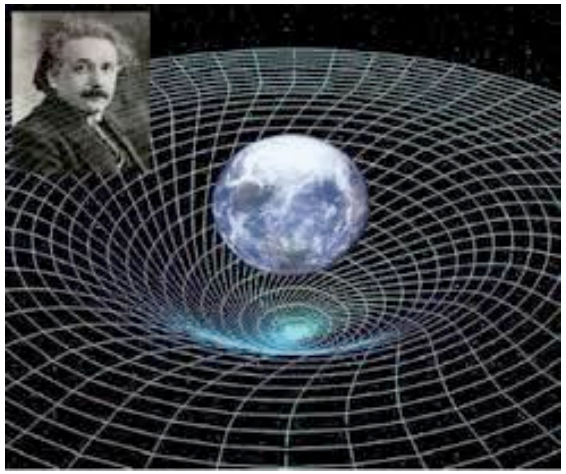


Status quo

- A részecskefizika Standard Modellje teljes a 2012-ben felfedezett Higgs-bozonnal, és jól leírja a laboratóriumokban, nagy energiájú részecskeütközésekben észlelt jelenségeket

- A mikro- és makrovilágot, az Univerzumot (egészen) jól értjük?!?





=?

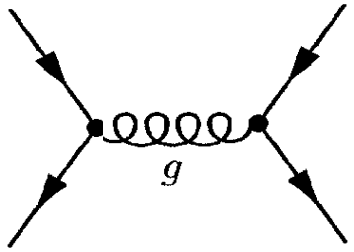


Nem egészen!

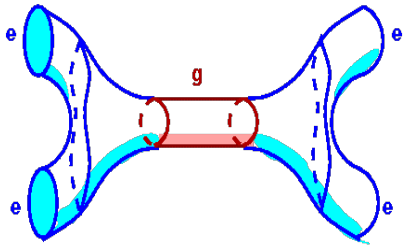
Kvatumgravitáció? Sötét anyag?

A mindenség elmélete? (Theory of Everything)

- A kvantum-gravitáció elméletéhez össze kell egyeztetni az általános relativitáselméletet és a kvantummechanikát
- A relativisztikus kvantum-mechanika (KM) szerint a kölcsönhatások a speciális relativitáselmélet sima tér-idejében pontszerűen (0-távolságon) mennek végbe

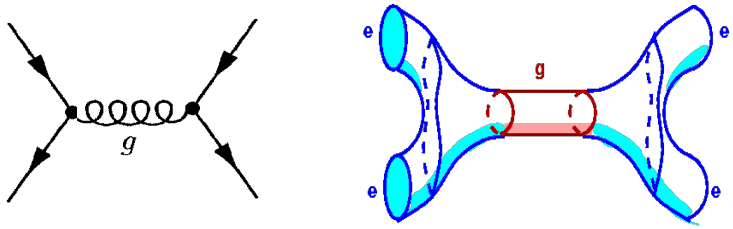


- Az általános relativitás elmélet szerint a tér-időt a benne lévő anyag alakítja
- A KM nem alkalmazható a gravitonra, a gravitáció feltételezett spin-2 közvetítő részecskéjére: a graviton viselkedése 0-távolságon nem értelmezhető
- Lehetséges kiút? A húrelméletben a részecskék nem pontszerűek, hanem kis elemi húrok rezgései
- A kölcsönhatások a részecskék között nem 0-távolságon, hanem a húrok méretének skáláján mennek végbe, ezzel feloldódhat az általános relativitáselmélet és a kvantum-mechanika közti ellentmondás

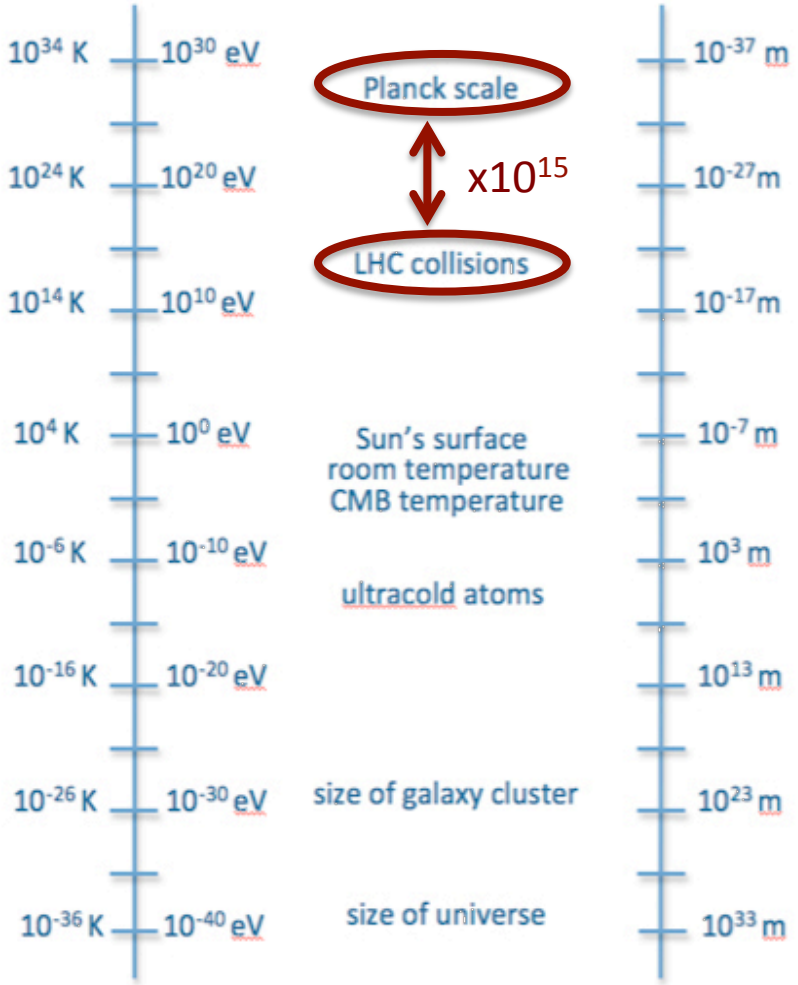


- A részecskék tulajdonságait az elemi húrok rezonancia frekvenciája határozza meg: különböző rezgésekhez különböző elemi részecskék tartoznak

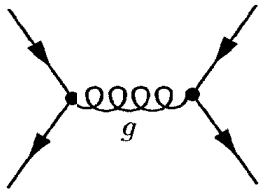
Húr-elmélet?!?

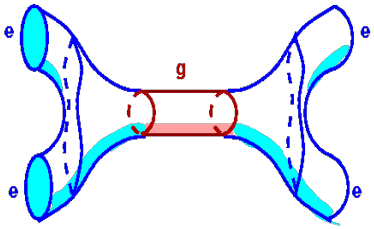


- Egy lehetséges jelölt a relativisztikus kvantummechanika és a gravitáció egyesítésére… DE…
- Természetes energia skála:
  Planck energia ~ 10^{19} GeV
- Nem tanulmányozható közvetlenül az LHC-n (sem jövőbeli részecskegyorsítóknál)!!!

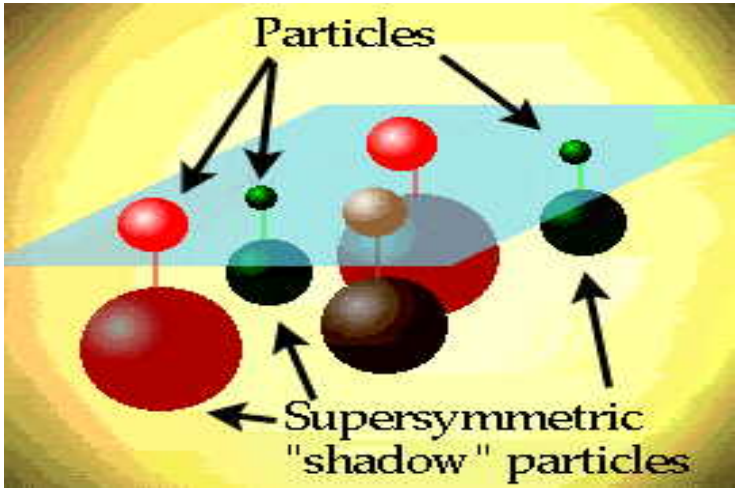


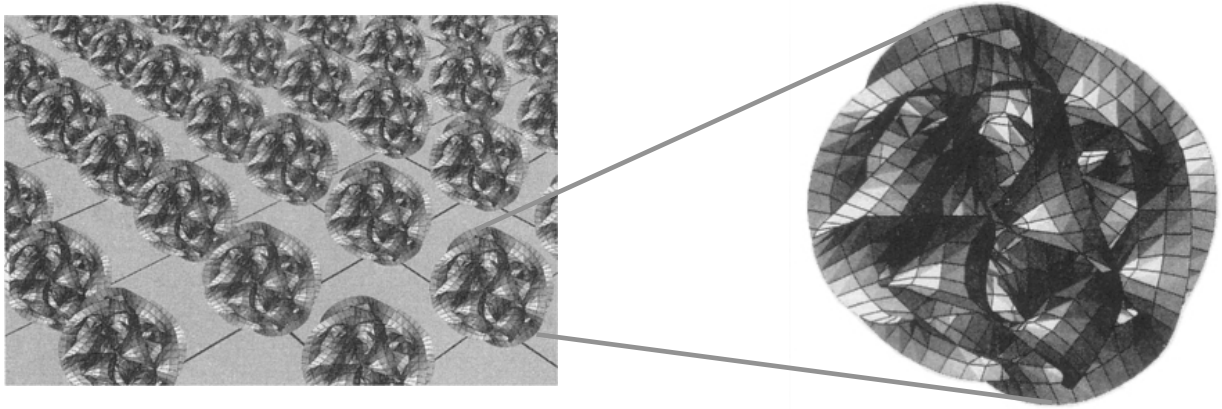
Húr-elmélet?!?



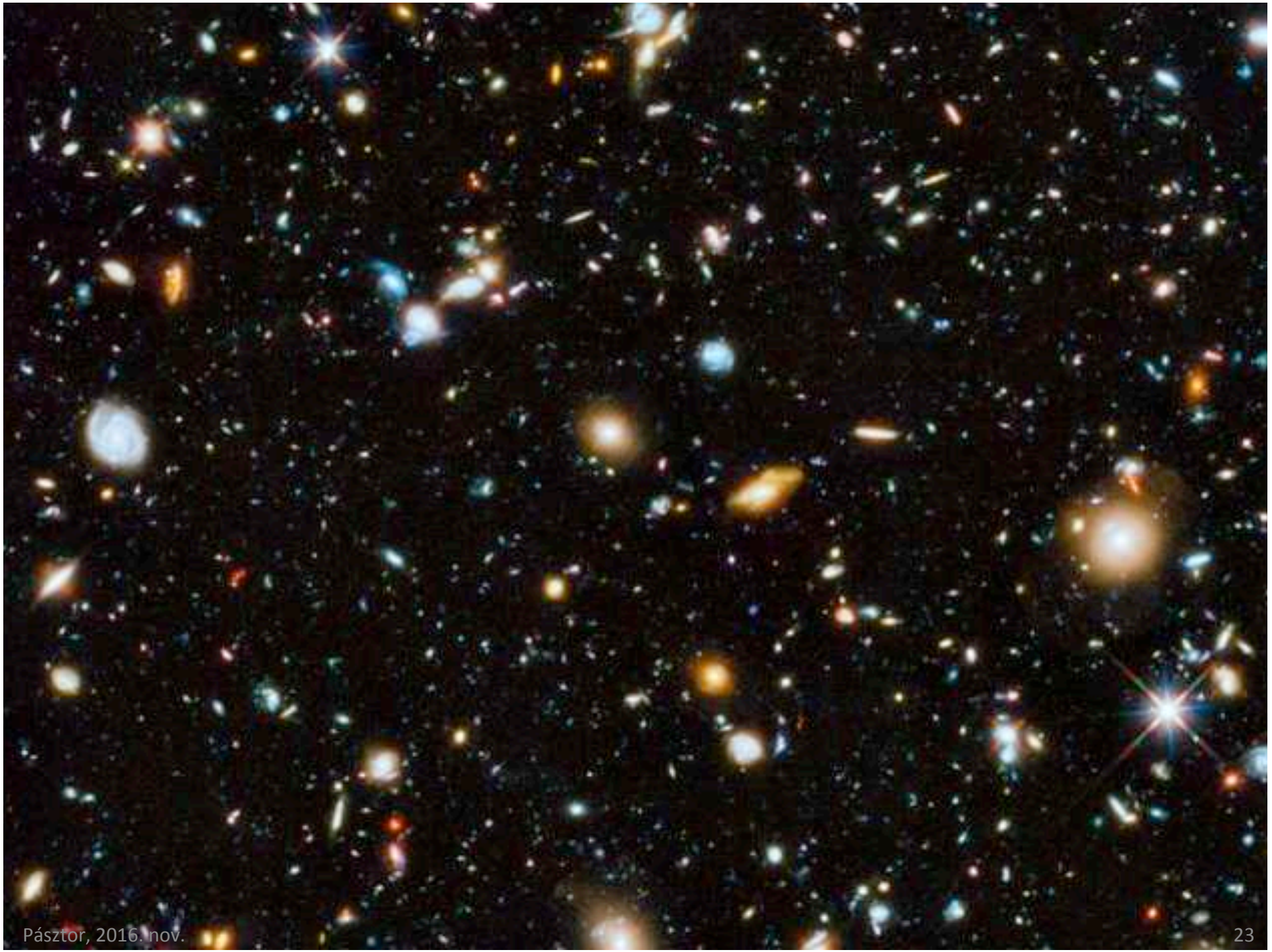


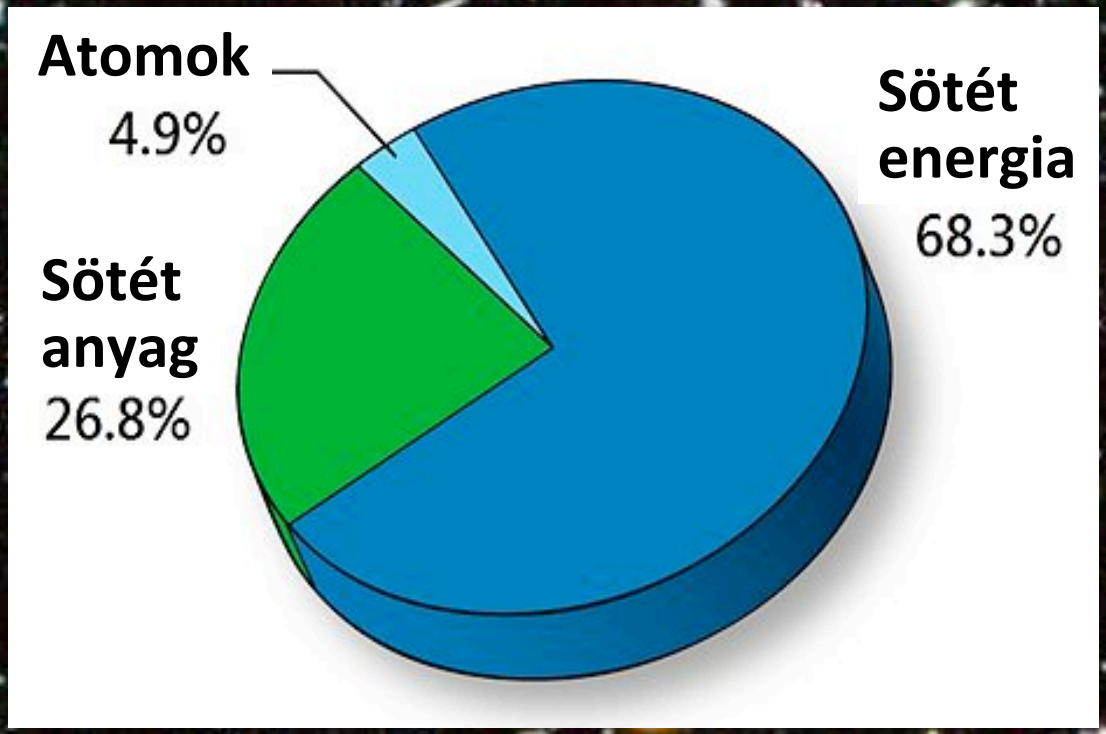
- Egy lehetséges jelölt a relativisztikus kvantummechanika és a gravitáció egyesítésére… DE…
- Természetes energia skála: Planck energia ~ 10^{19} GeV
- Nem tanulmányozható közvetlenül az LHC-n (sem jövőbeli részecskegyorsítóknál)!!!
- Általános jóslatok
  - **Szuperszimmetria**
  - **További térbeli dimenziók** (11-dimenziós tér-idő)





Extra spatial dimensions: artistic representation of 6D Calabi-Yau space

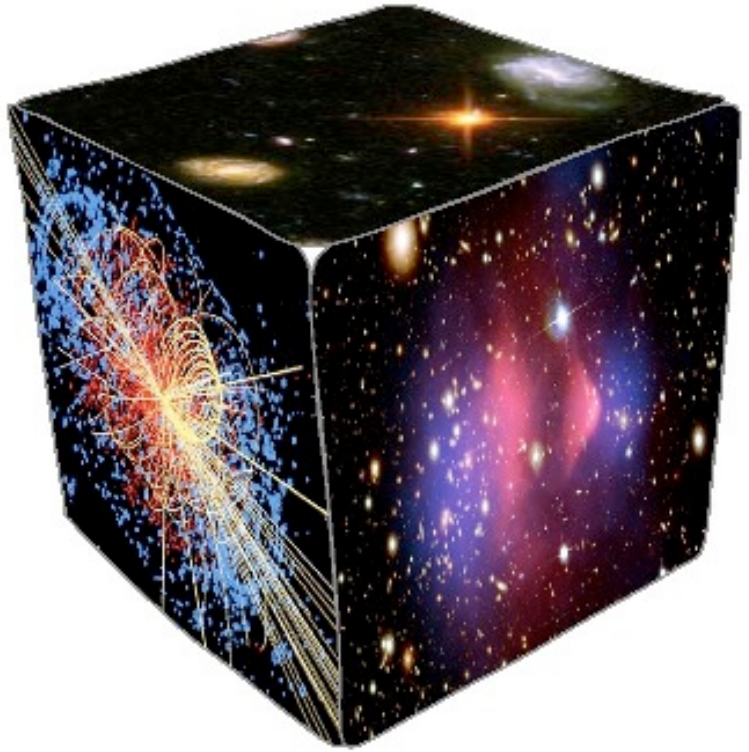



Atomok
4.9%
Sötét
energia
68.3%
Sötét
anyag
26.8%

Nyitott kérdések az Univerzumról

- Egy minden ismert kölcsönhatást magába foglaló **alapvető elméletet** keresünk („Theory of Everything”): a Standard Modell nem tartalmazza a gravitációt
  - Talán húrelméleti alapokon nyugszik?
  - Vannak további térbeli dimenziók?
  - **Szuperszimmetrikus a természet?**
  - Léteznek eddig fel nem fedezett, új kölcsönhatások?
- Mi az Univerzum 95%?

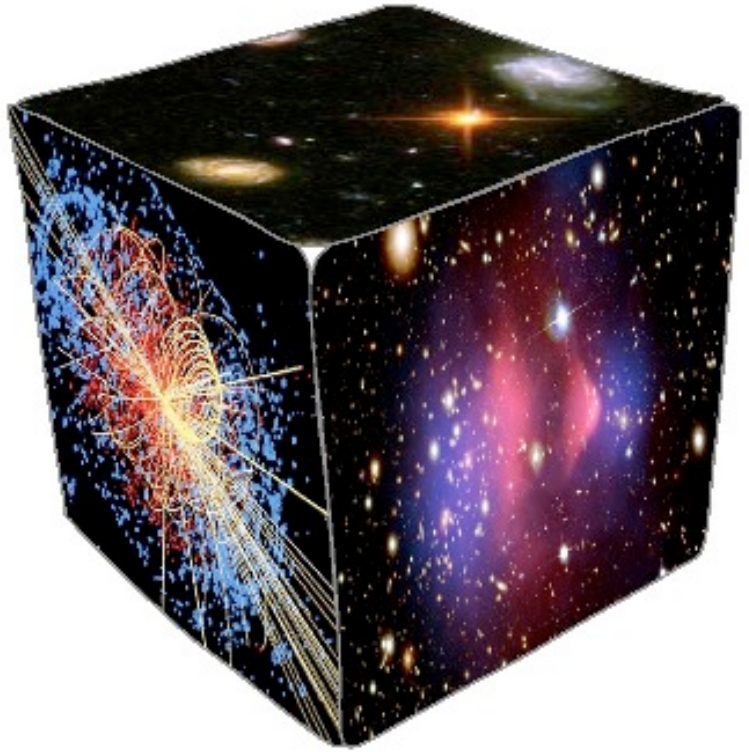
  Mi a sötét anyag? A sötét energia?
- Miért dominál az anyag az antianyag fölött a természetben?



Nyitott kérdések az Univerzumról

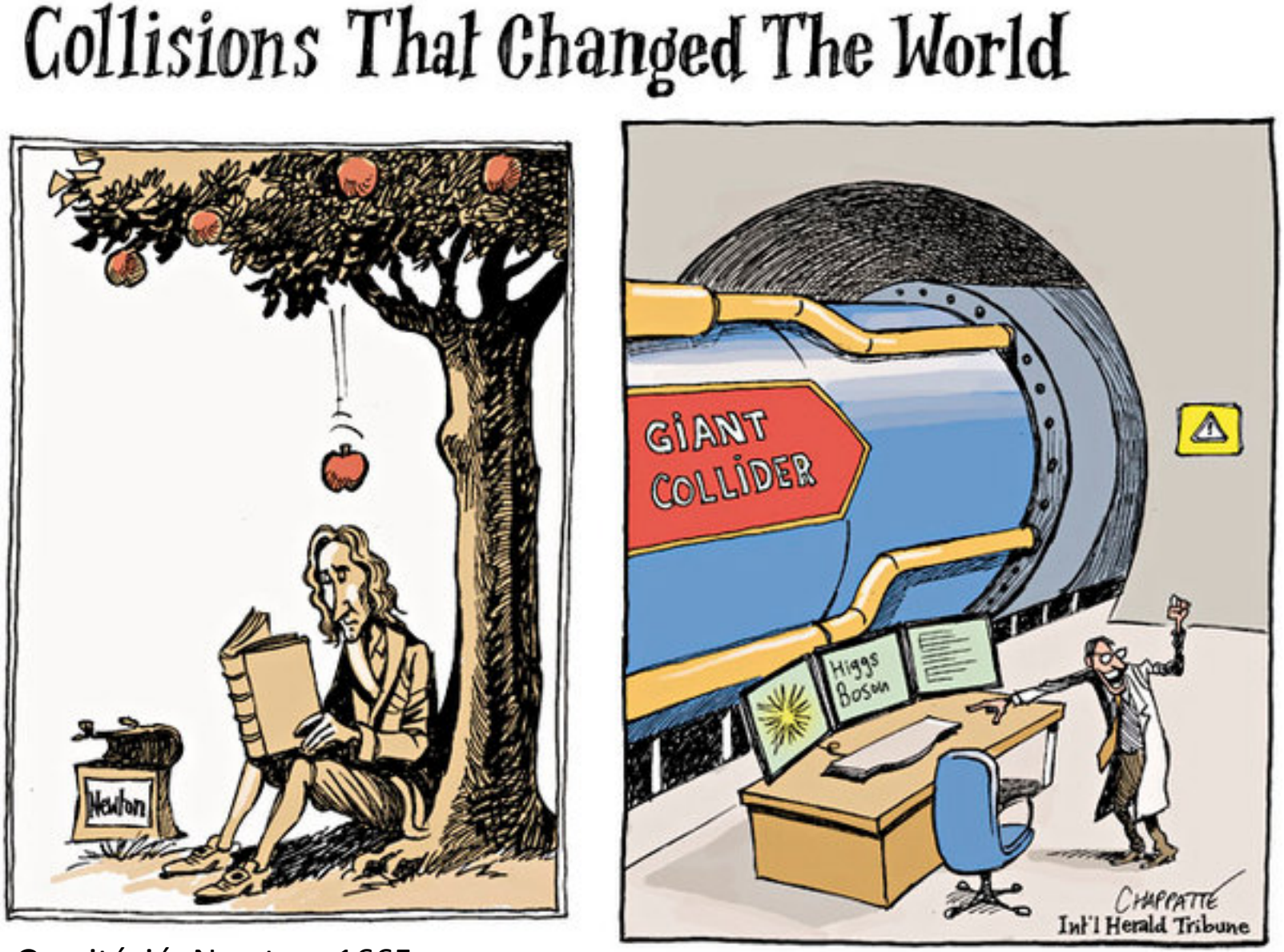
- Egy minden ismert kölcsönhatást magába foglaló **alapvető elméletet** keresünk („Theory of Everything”): a Standard Modell nem tartalmazza a gravitációt
  - Talán húrelméleti alapokon nyugszik?
  - Vannak további térbeli dimenziók?
  - **Szuperszimmetrikus a természet?**
  - Léteznek eddig fel nem fedezett, új kölcsönhatások?
- Mi az Univerzum 95%?

  Mi a sötét anyag? A sötét energia?
- Miért dominál az anyag az antianyag fölött a természetben?



→ Csináljunk sötét anyagot a laboratóriumban!

A világot megváltoztató ütközések



Gravitáció, Newton, 1665

Higgs-bozon (a tömeg eredete), CERN, 2012

Kitérő: Fermionok és bozonok

- Spin: belső impulzusmomentum, a részecske megváltoztathatatlan tulajdonsága
- Kvantált: $S = \hbar \sqrt{s(s+1)}$ s = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, …
- Fermionok (s=1/2, 3/2, …)
- Bozonok (s=0,1,2,…)

- Elektron: s=1/2 fermion
  - Belső impulzusmomentuma (spinje) két értéket vehet fel (+1/2, -1/2), azaz két irányba állhat
- Analógia:
  - Föld forgása a tengelye körül → spin
  - Föld keringése a Nap körül → pályamomentum

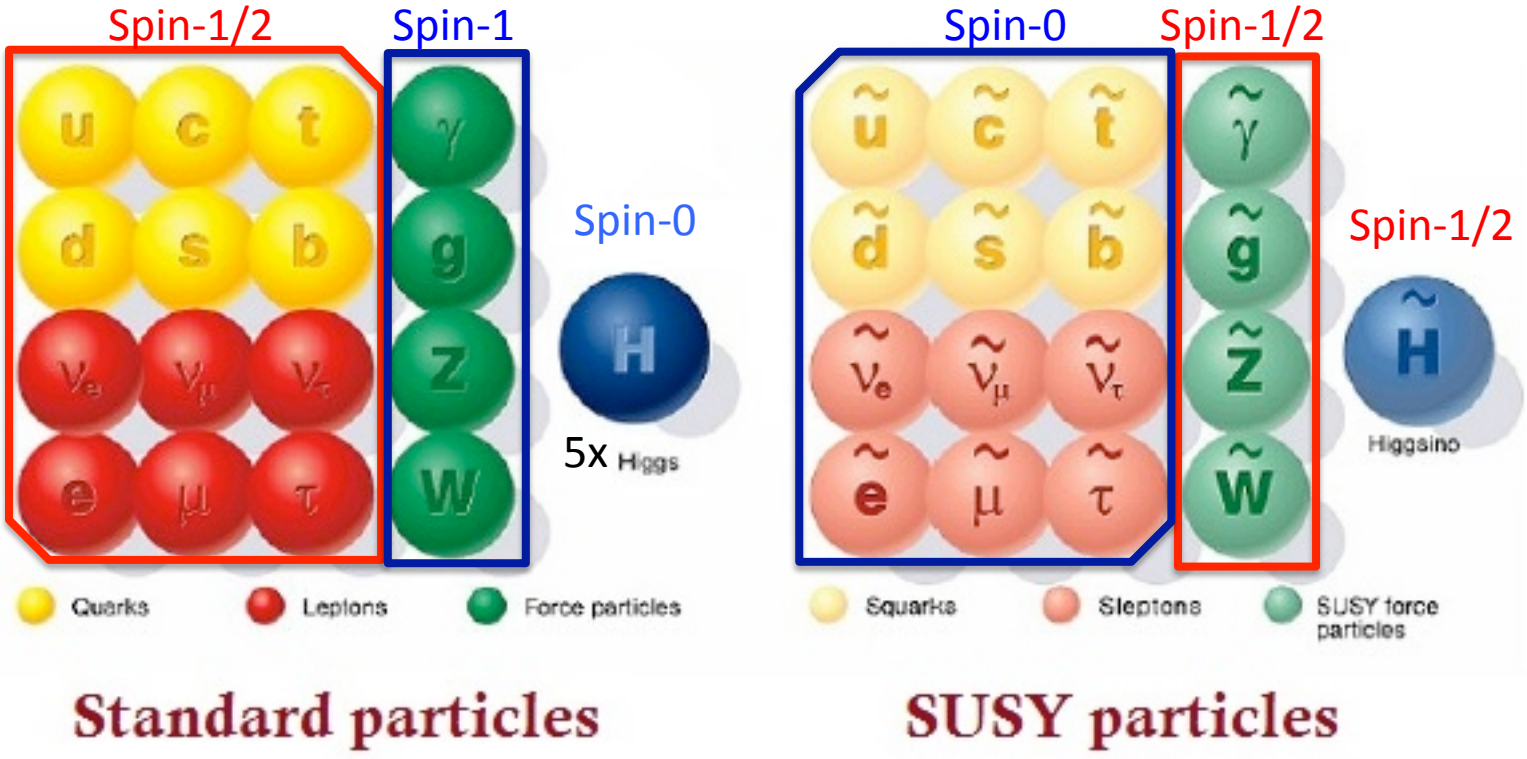


- Pauli kizárási elv: Egy kvantumrendszerben nem lehet két teljesen azonos kvantumszámokkal rendelkező fermion
- Kiterjedt atomi elektronpályák különböző pályamomentumokkal, pályánként max. 2 elektronnal

- Bozonok szeretnek azonos kvantumállapotba gyűlni
- Bose-Einstein korrelációk
- T~0 K Bose-Einstein kondenzátum

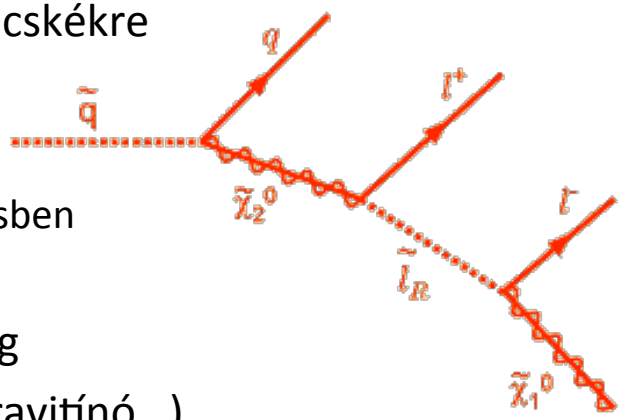
Szuperszimmetria (SUSY) és sötét anyag

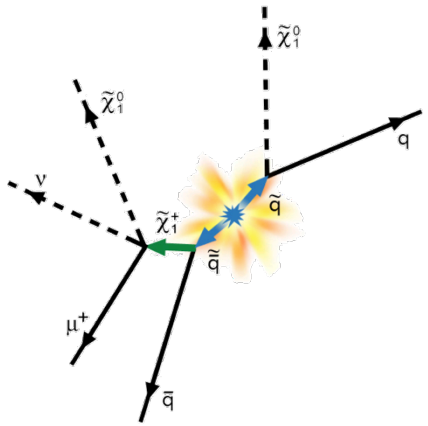
- Szimmetria a fermionok és a bozonok között
- A tér-idő legáltalánosabb szimmetriája
- Minden ismert részecskének jósol egy eddig még nem észlelt pártját
- A legkönnyebb SUSY partner ideális sötét anyag jelölt!



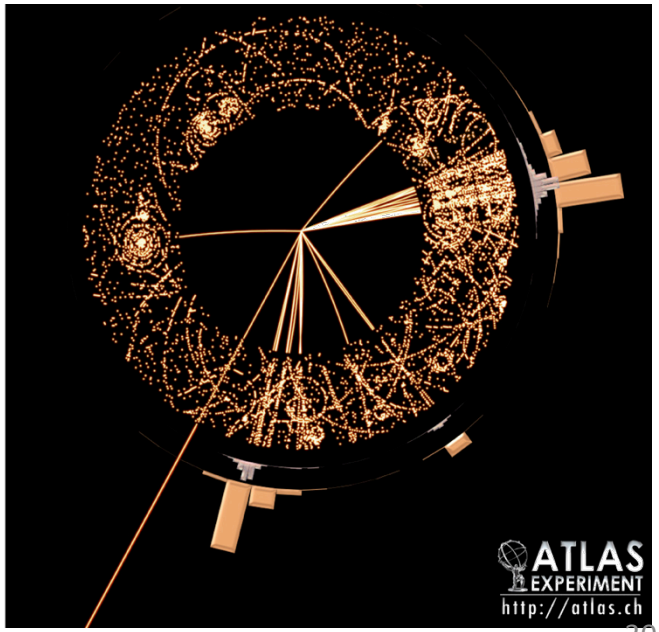
SUSY részecskék, SUSY sötét anyag keresése

- R-paritás multiplikatív kvantumszám: +1 SM, -1 SUSY részecskékre
- Ha R-paritás megmarad:
  - SUSY részecske keletkezés párban
  - Bomlás közönséges és SUSY részecskékre, gyakran több lépésben
  - A legkönnyebb SUSY részecske stabil
- A legkönnyebb SUSY részecske természete a modelltől függ
- Gyakran semleges, gyengén kölcsönható (pl. neutralínó, gravitínó…)
  - Nem figyelhető meg közvetlenül a detektorban → **hiányzó energia**
  - Sötét anyag jelölt!
- Ha a SUSY részecskék tömege O(TeV), amely energia-tartományt bizonyos elméleti megfontolások előnyben részesítenek, az LHC-n észlelhetünk SUSY részecskéket

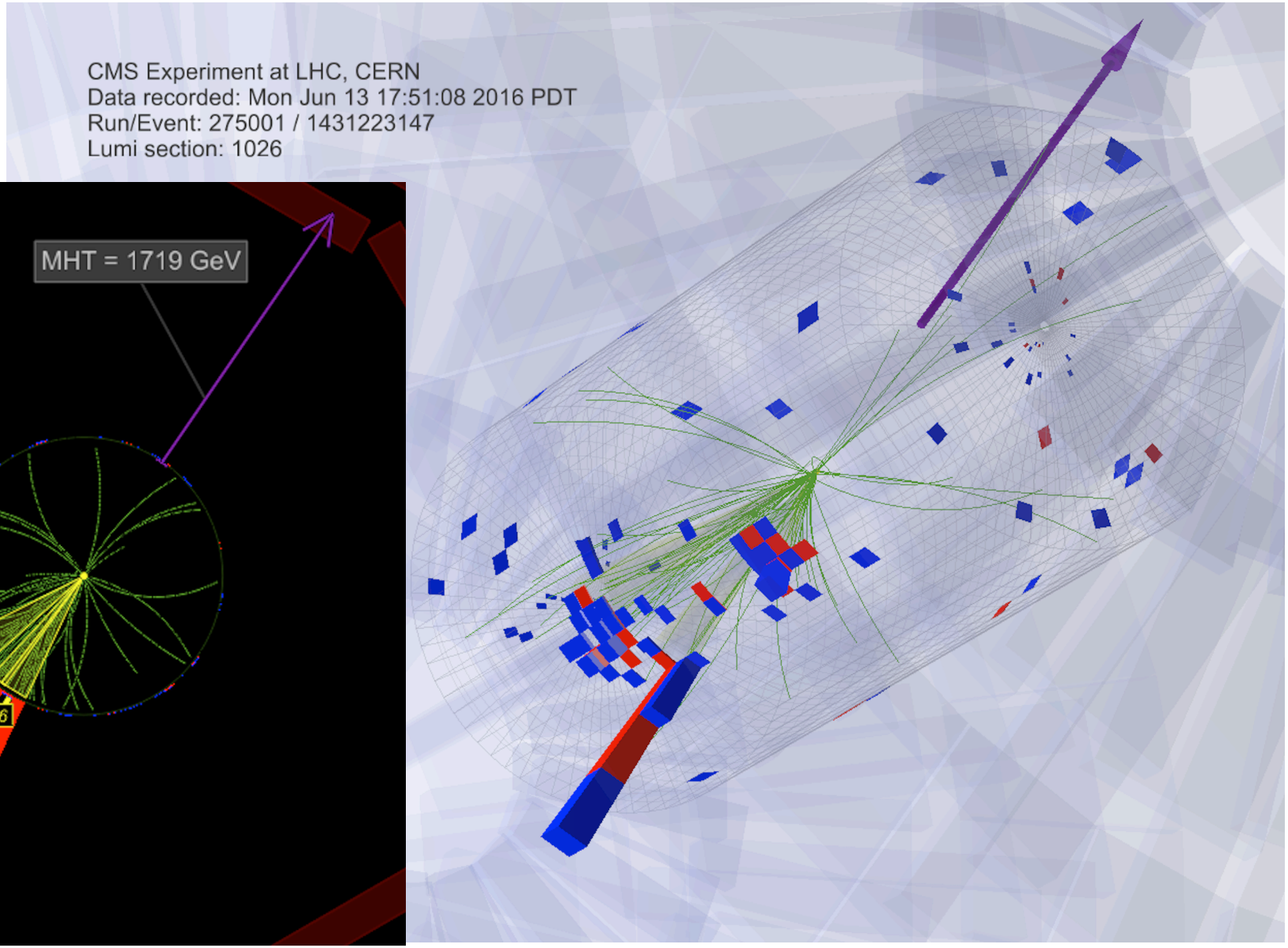


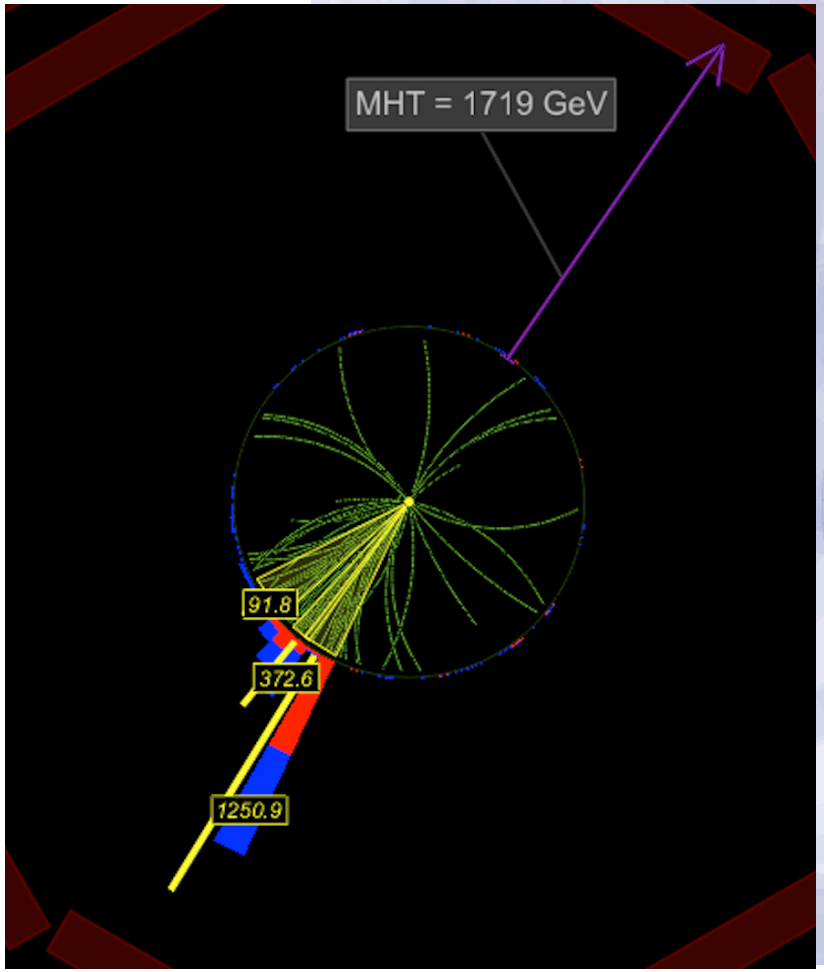


q = quark μ = muon
$\tilde{q}$ = squark ν = neutrino
$\bar{q}$ = anti-quark $\tilde{\chi}_1^+$ = chargino
$\tilde{q}$ = anti-squark $\tilde{\chi}_1^0$ = neutralino
(lightest super-partner)

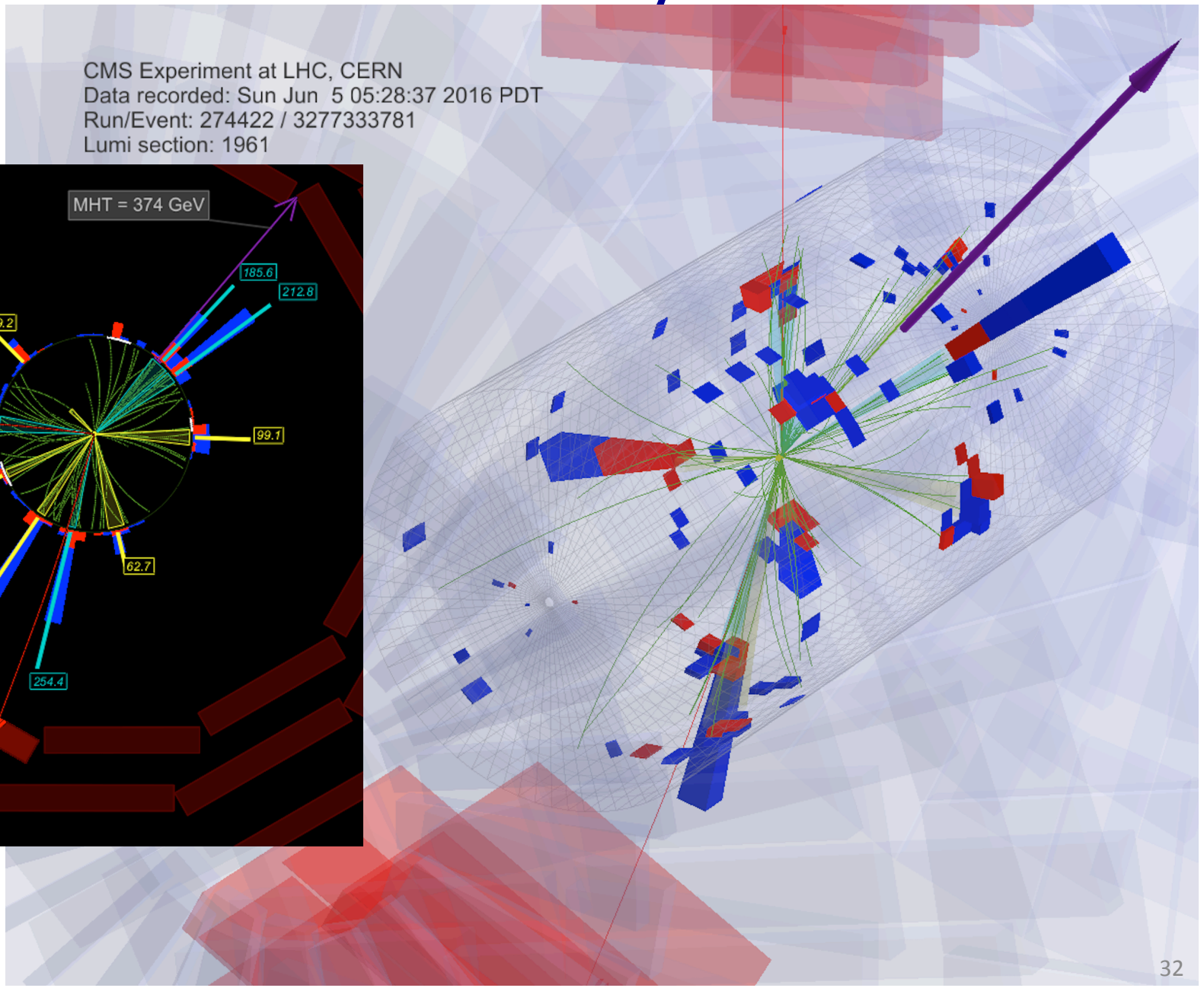


A SUSY részecskék nyomában





A SUSY részecskék nyomában



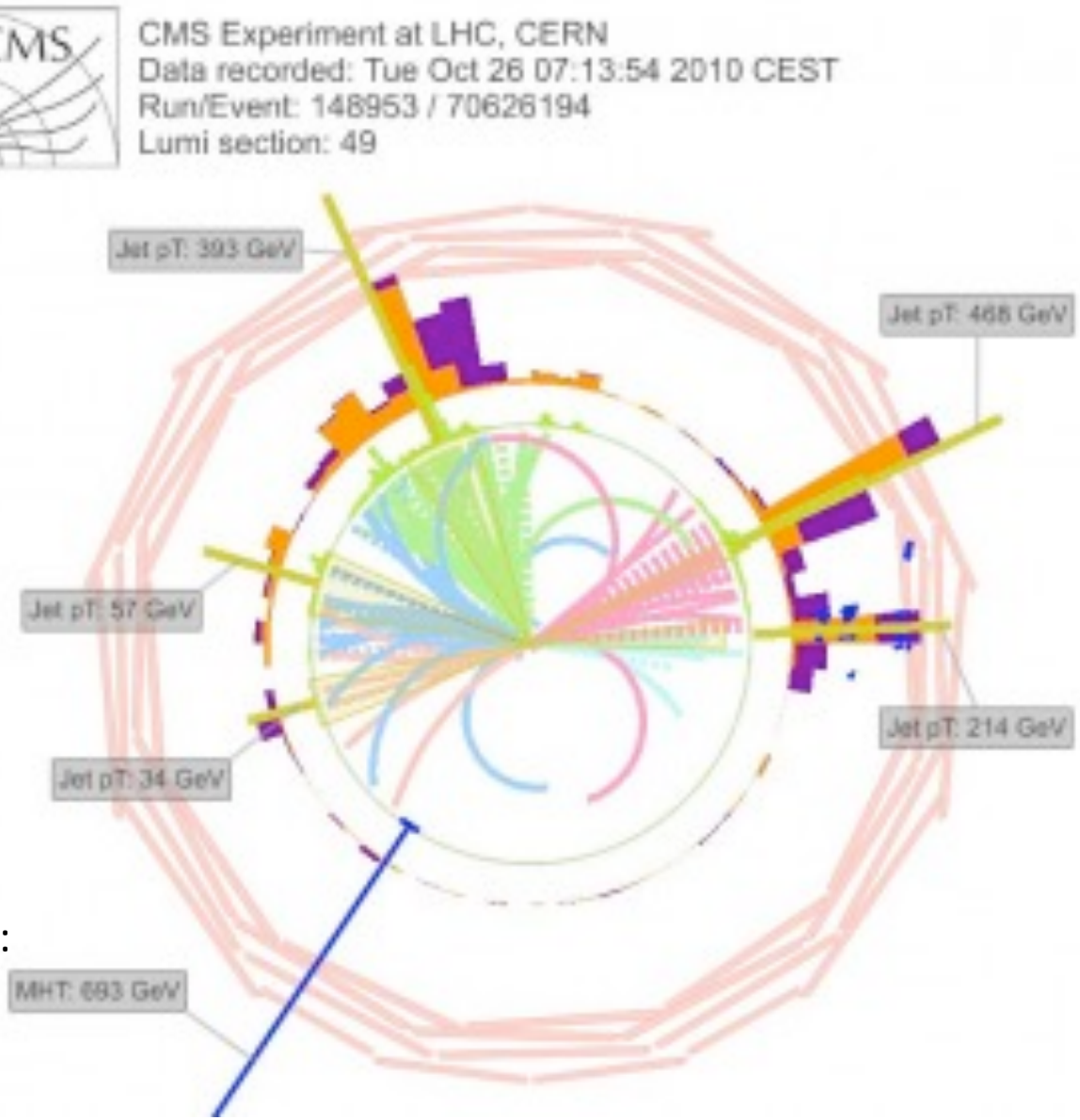
Hiányzó energia

Hogyan mérjük?

- Összegezzük a rekonstruált fizikai objektumok (elektronok, müonok, fotonok, hadronzáporok, …) impulzusát: $\Sigma \boldsymbol{p}$
- Energia- és impulzus megmaradásból (elhanyagolva a részecskék nyugalmi tömegének megfelelő energiát kinetikus energiájukhoz képest):

  $E_{\text{hiányzó}} = |\Sigma \boldsymbol{p}|$
- Alternatív mennyiség csak részecskezáporokat használva:

  $H_{\text{T,hiányzó}} = |\Sigma \boldsymbol{p}_{\text{jets}}|$



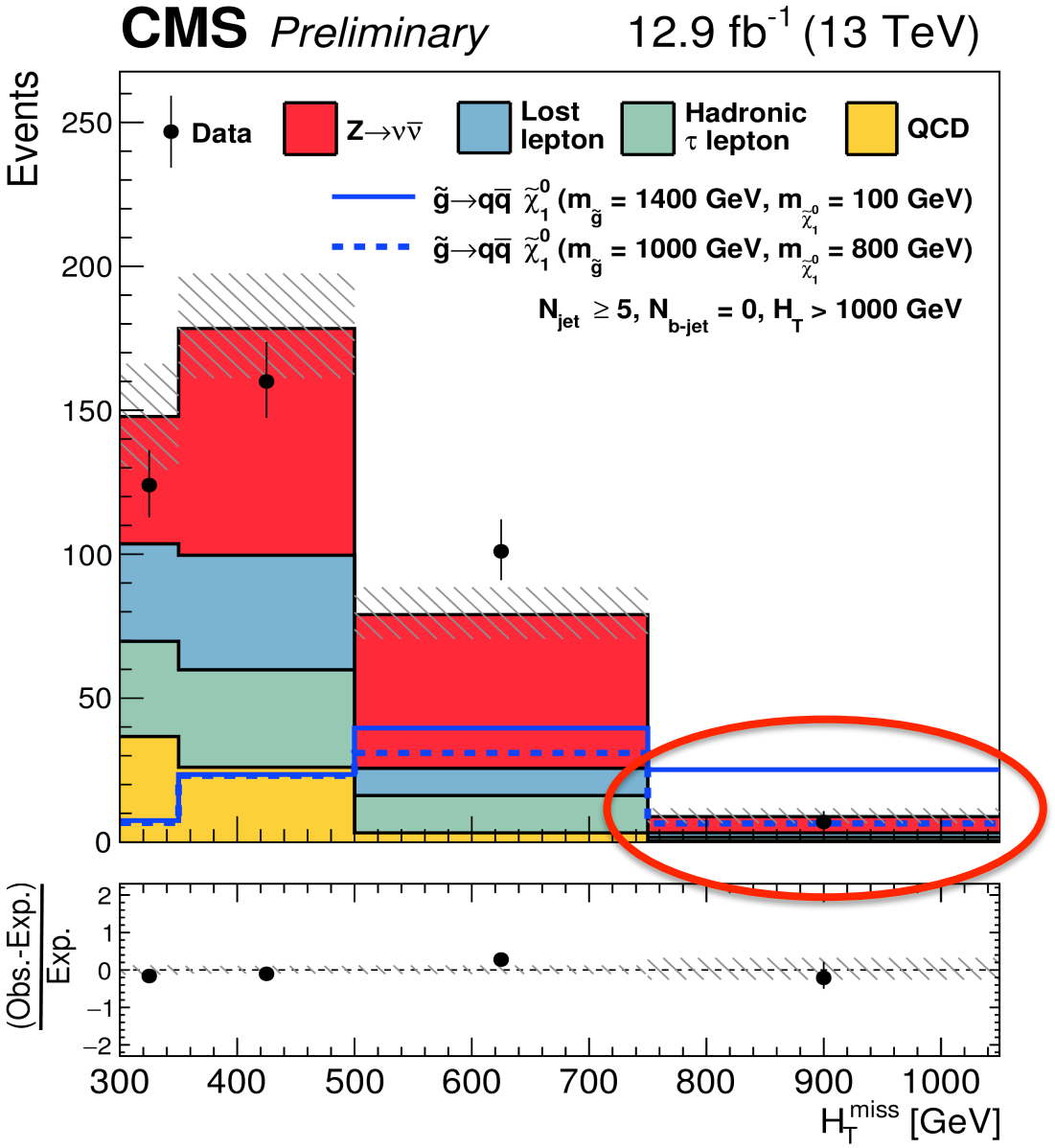
Hiányzó energia

Hogyan mérjük?

- Összegezzük a rekonstruált fizikai objektumok (elektronok, müonok, fotonok, hadronzáporok, …) impulzusát: $\Sigma \boldsymbol{p}$
- Energia- és impulzus megmaradásból (elhanyagolva a részecskék nyugalmi tömegének megfelelő energiát kinetikus energiájukhoz képest):

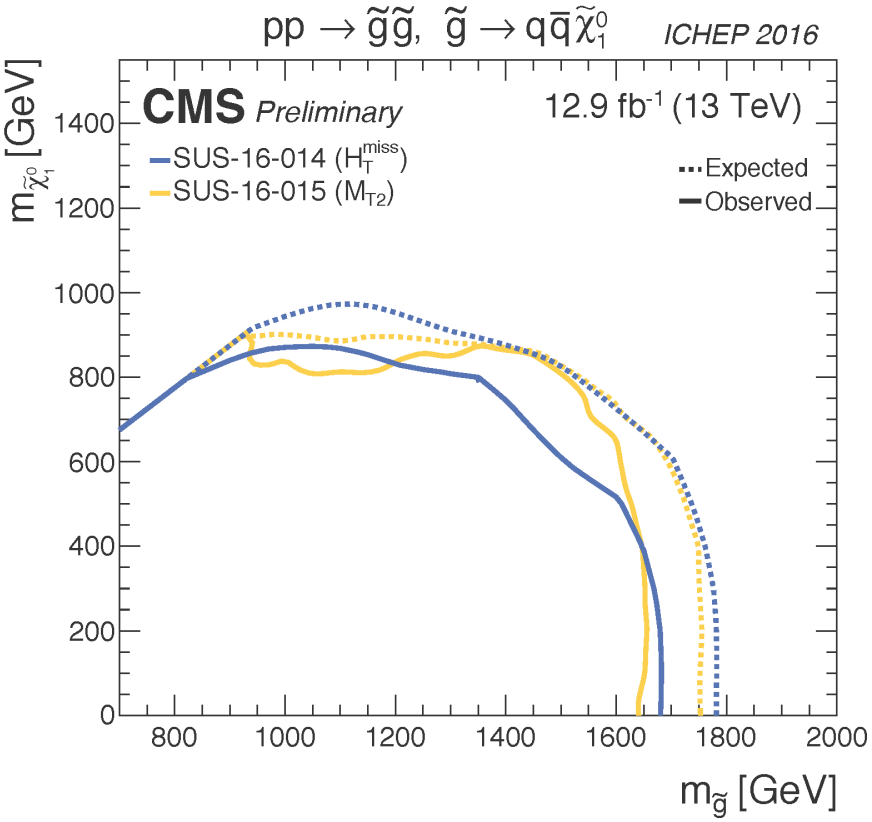
  $E_{\text{hiányzó}} = |\Sigma \boldsymbol{p}|$
- Alternatív mennyiség csak részecskezáporokat használva:

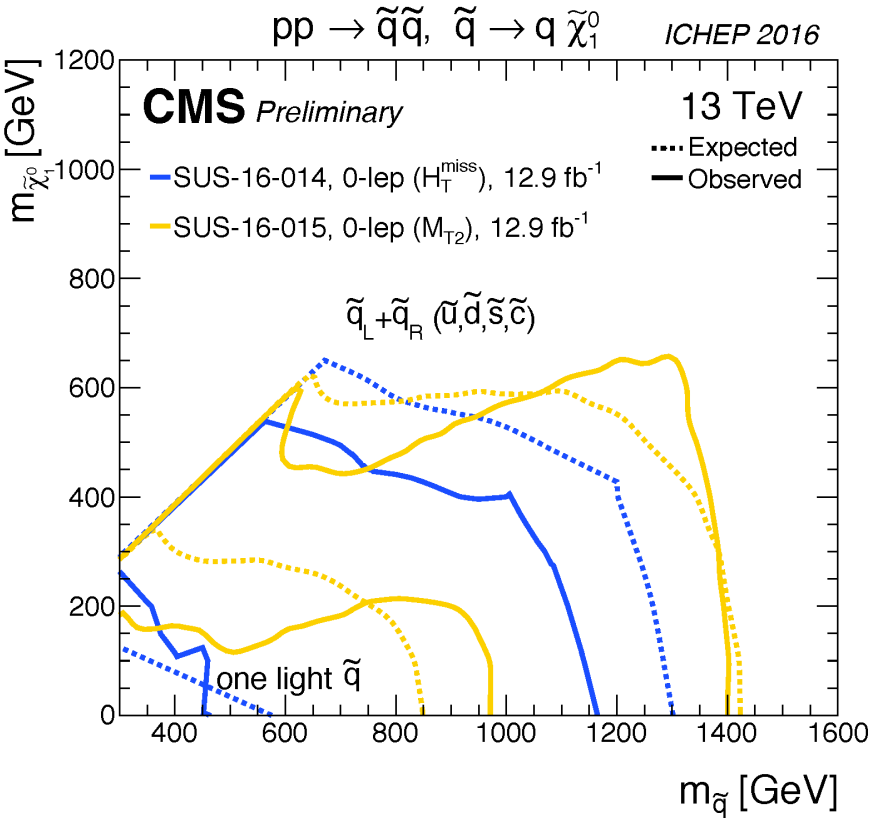
  $H_{\text{T,hiányzó}} = |\Sigma \boldsymbol{p}_{\text{jets}}|$



SUSY részecskék keresése

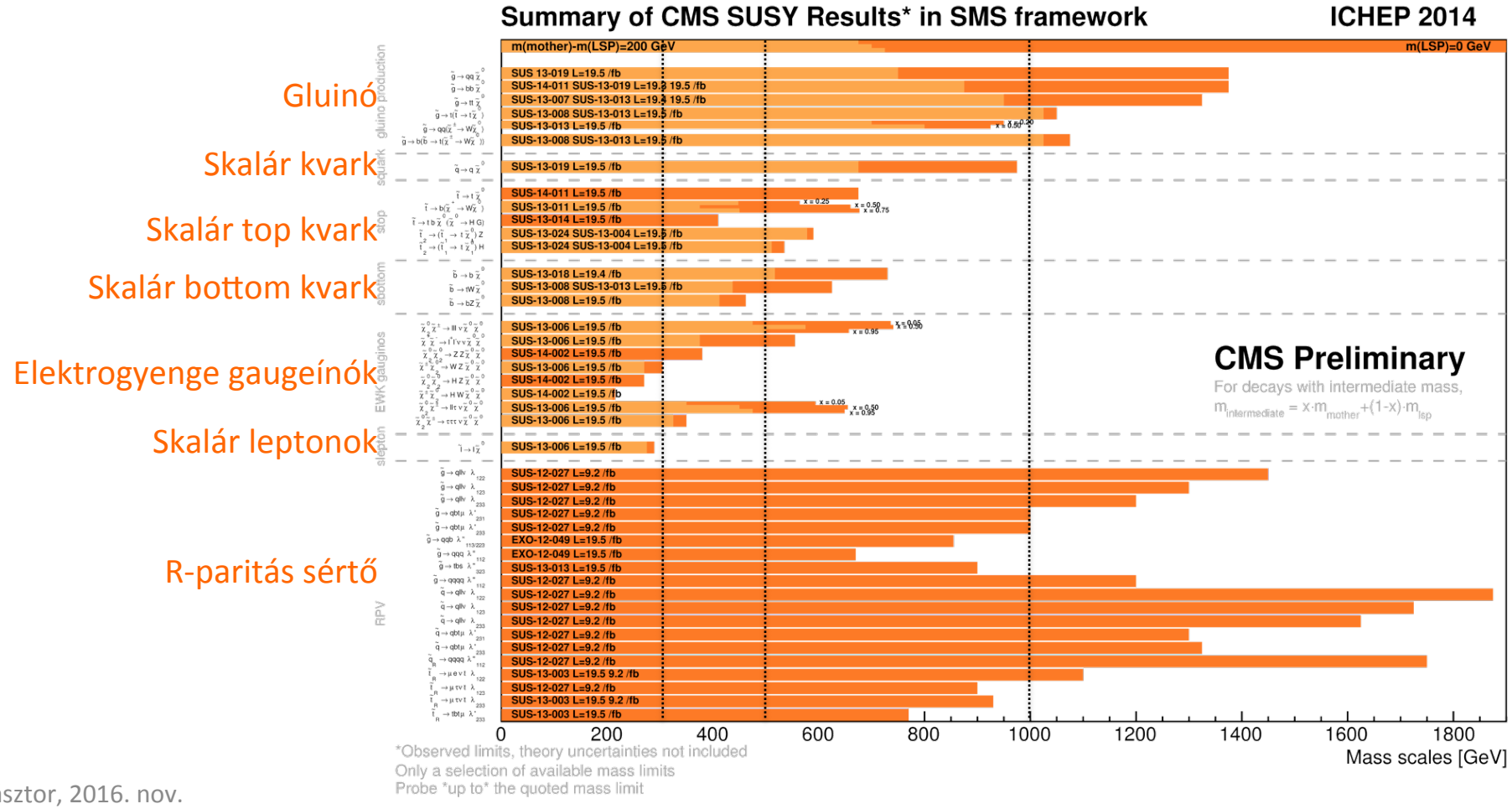
- Nagyszámú modell, sok lehetséges végállapot, (egyelőre negatív) eredmények sokasága
- Korlátok a modell paramétereken, a partnerrészecskék tömegén





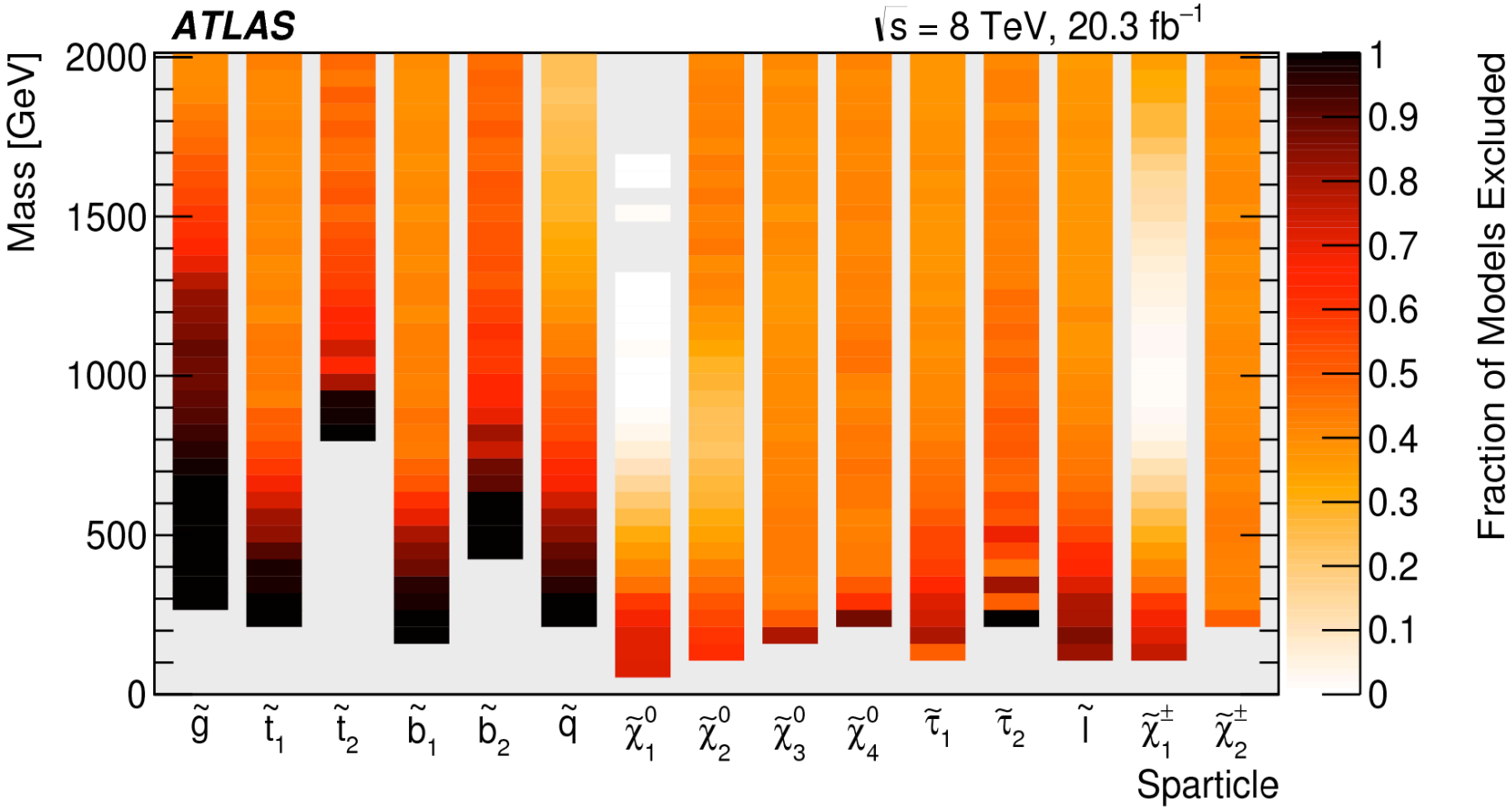
SUSY részecskék keresése

- Nagyszámú modell, sok lehetséges végállapot, (egyelőre negatív) eredmények sokasága
- Korlátok a modell paramétereken, a partnerrészecskék tömegén

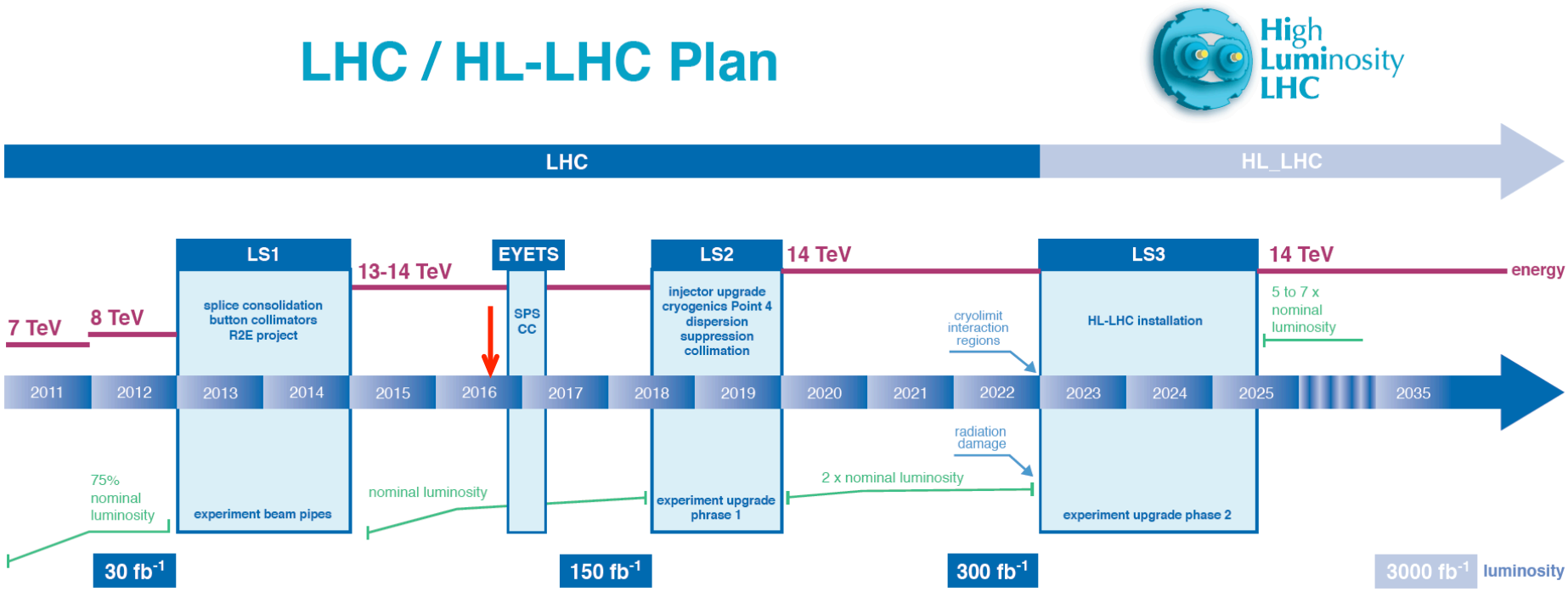


SUSY részecskék keresése

- Az eddigi eredmények kizárják a szuperszimmetrikus modelleket?
- NEM!!! Szuperszimmetrikus részecskék jóval 1 TeV tömeg alatt is megbújhatnak még az LHC adatokban



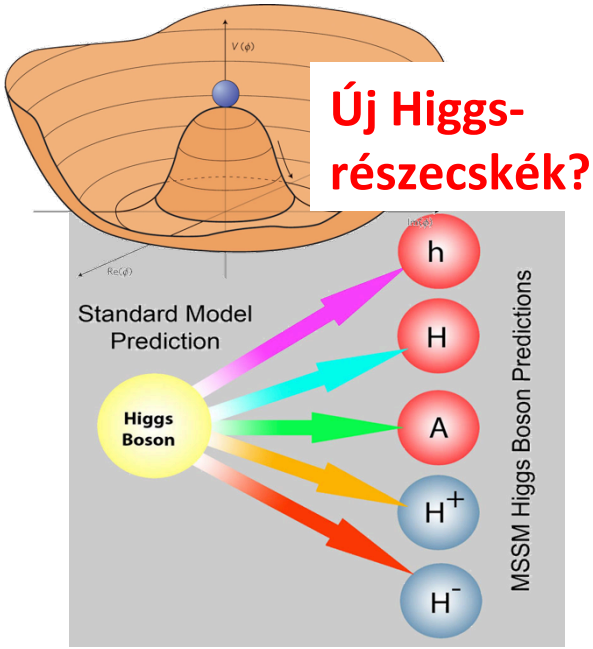
LHC tervek



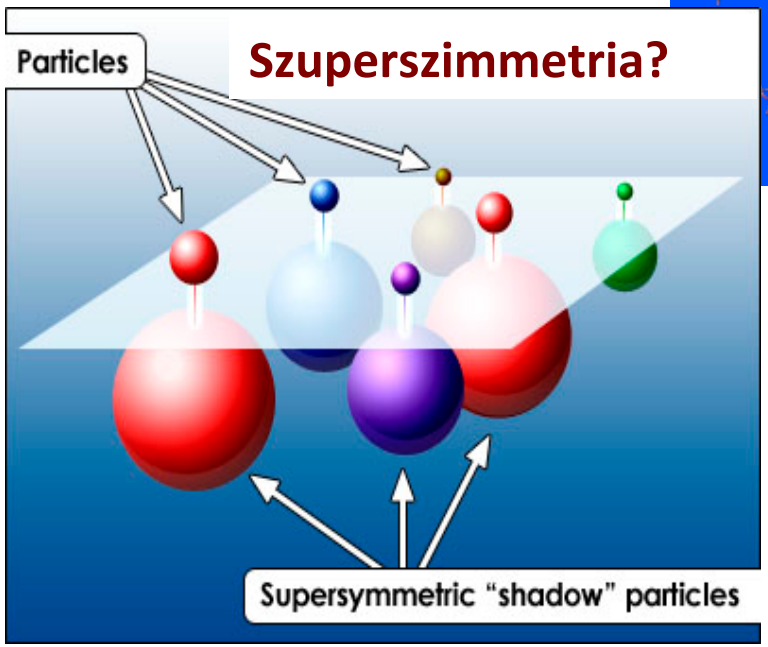
Még csupán az elején járunk az LHC programnak (a gyűjtendő adatok 1-2%-ánál)

Új eredmények (és - reményeink szerint - új felfedezések) kapujában…

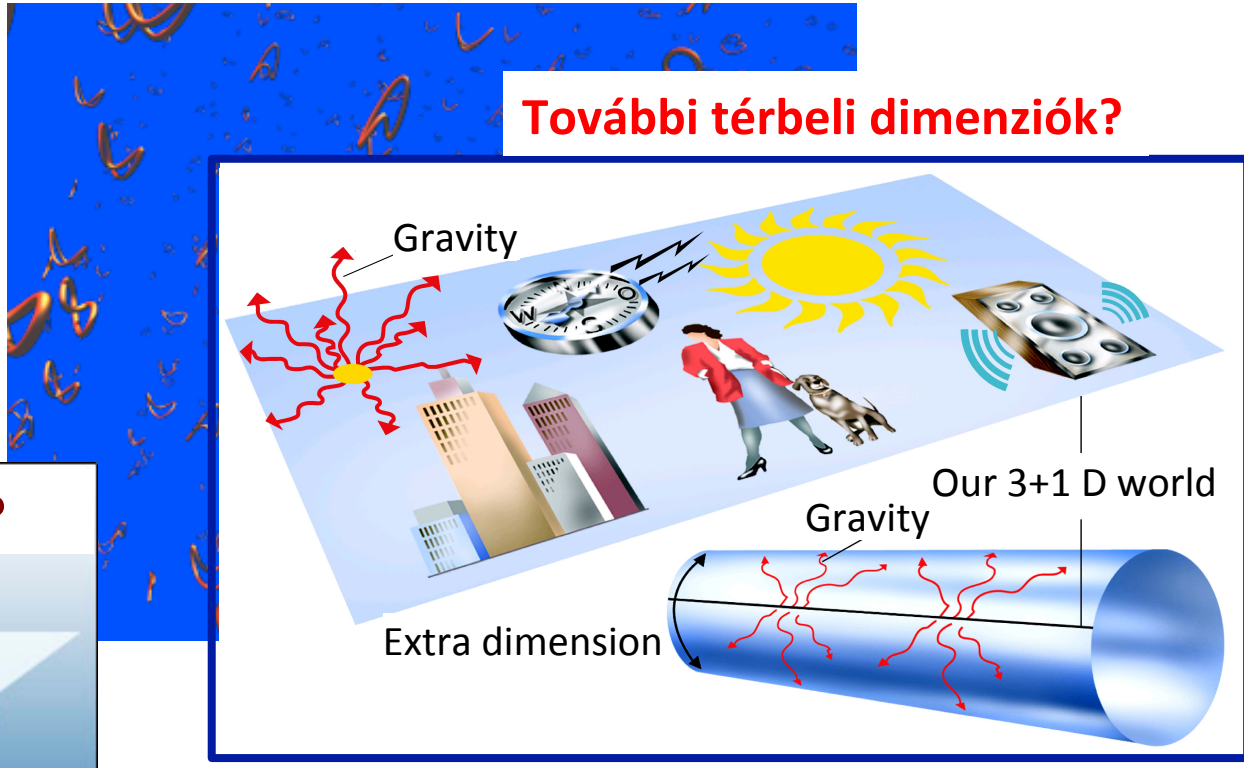
Mit hoz(hat) a jövő?



Új Higgs-részecskék?



Szuperszimmetria?

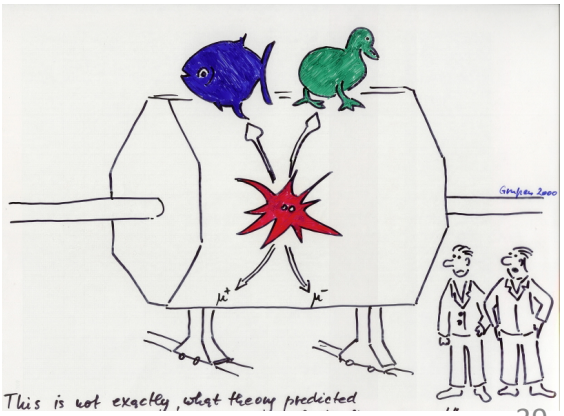


További térbeli dimenziók?

Sötét anyag?

Új kölcsönhatások?

Nem várt meglepetés?



Kapcsolódó AtomCsill előadások (http://atomcsill.elte.hu/)

- 2016. október 6. Pásztor Gabriella (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):
  Új Fizika: Az ismeretlen nyomában a Nagy Hadronütköztetővel
- 2016. szeptember 8. Dávid Gyula (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):
  A sötét anyag nyomában
- 2014. április 10. Varga Dezső (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont):
  A részecskefizika eszköztára: felfedezések és detektorok
- 2012. szeptember 13. Dávid Gyula (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):
  A tömeg eredete és a Higgs-mező
- 2011. május 19. Barnaföldi Gergely (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont):
  Mi lehet a következő Nobel-díj a CERN LHC-nél?
- 2010. november 18. Varga Dezső (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):
  A legkisebb részecskék a világ legnagyobb gyorsítójában
- 2009. február 12. Cynolter Gábor (ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék):
  Extra dimenziók
- 2007. december 20. Veres Gábor (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):
  Milyen eszközökkel figyelhetők meg a világ legkisebb alkotórészei?
- 2007. szeptember 27. Katz Sándor (ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék):
  Az elemi részek fizikája és az anyag eredete az Univerzumban