A standard modellen túl: új fizika keresése a CERN-ben

Pásztor Gabriella

MTA-ELTE Lendület CMS Részecske- és Magfizikai Kutatócsoport

ELTE TTK Atomfizikai Tanszék



CERN25, Magyarok a nagyenergiás fizika élvonalában
MTA, 2018. november 14.

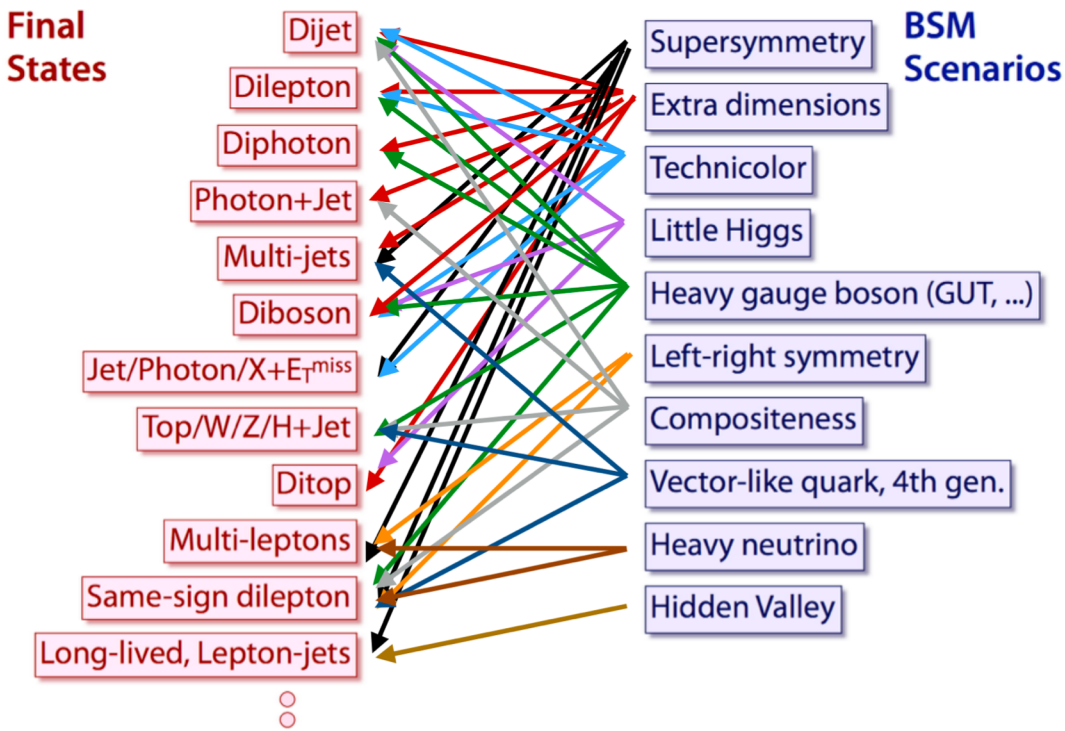
Miért keressük Új Fizika közvetlen nyomait?

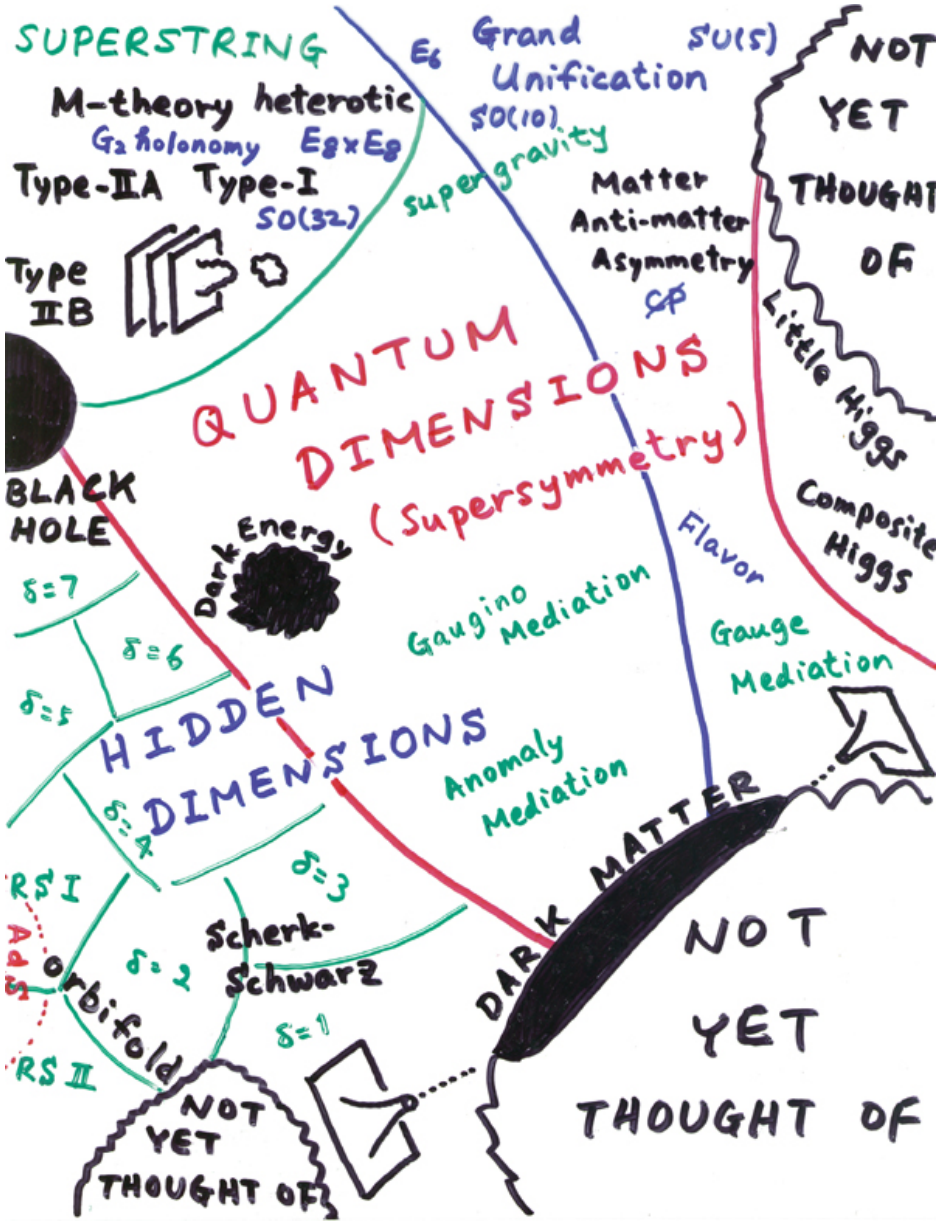


- Standard Modell teljes a Higgs-bozon felfedezése óta, pontosan leírja a nagyenergiás ütközésekben megfigyelteket
- Megfigyelések
  - **Neutrínó oszcilláció** → Tömeg eredete? Jobb kezes neutrínó?
  - **Sötét anyag** → Új paritás típusú szimmetria? WIMP?
  - **Anyag - antianyag aszimmetria** → Újabb CP-sértés forrás?
- Elméleti megfontolások
  - **Nagy egyesített elmélet** → Új kölcsönhatások, mértékbozonok?
  - **Gravitáció és mértékkölcsönhatások közös elméletbe foglalása** → Húrelmélet? SUSY? Extra dimenziók?
  - **Elektrogyenge skála stabilizálása a kvantumkorrekciókra** → Új szimmetria? Új részecskék?

Új Fizika?

- Rengeteg elméleti javaslat
- Nagyszámú lehetséges új folyamat
- Topológikus keresések





Magyar LEP és LHC hozzájárulás Új Fizika témában



Múlt

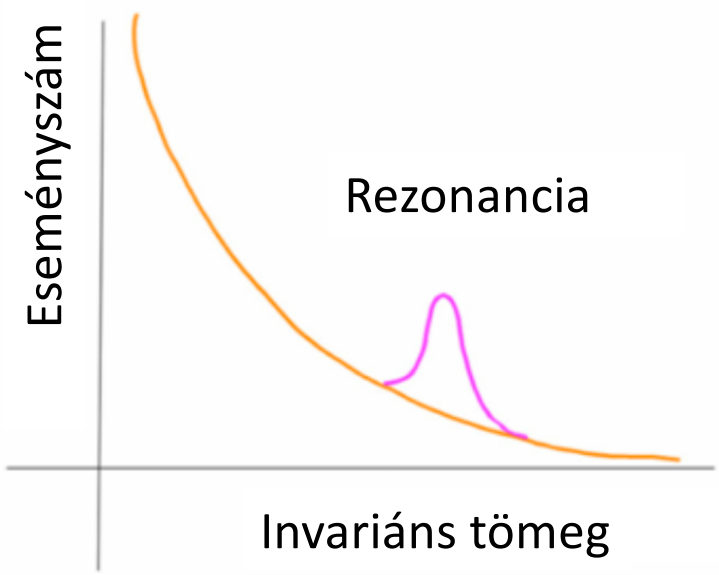
- **OPAL @ LEP**
  - Töltött Higgs-bozonok keresése (Hajdu Csaba, Horváth Dezső, PG)
  - R-paritás sértő **szuperszimmetria** keresése (PG)
  - Nagy **extra dimenziók** kutatása ee → ZZ, $\ell\ell$ differenciális hatáskeresztmetszet mérésével (PG)
  - Hozzájárulás sok SUSY és exotikus fizika analízishez mint OPAL Fizika Koordinátor (PG)
- **L3 @ LEP**
  - Töltött Higgs-bozonok keresése (Szillási Zoltán)
- **ATLAS @ LHC**
  - Nagy tömegű Drell-Yan leptonpár hatáskeresztmetszet mérés és új **rezonanciák** (Z', G_{KK}) keresése (PG)
  - Higgs-bozon keresése H → ZZ végállapotban (Krasznahorkay Attila, PG)
  - Vektorbozon párkeltés vizsgálata, **anomális csatolások** (PG)

Múlt - jelen - jövő

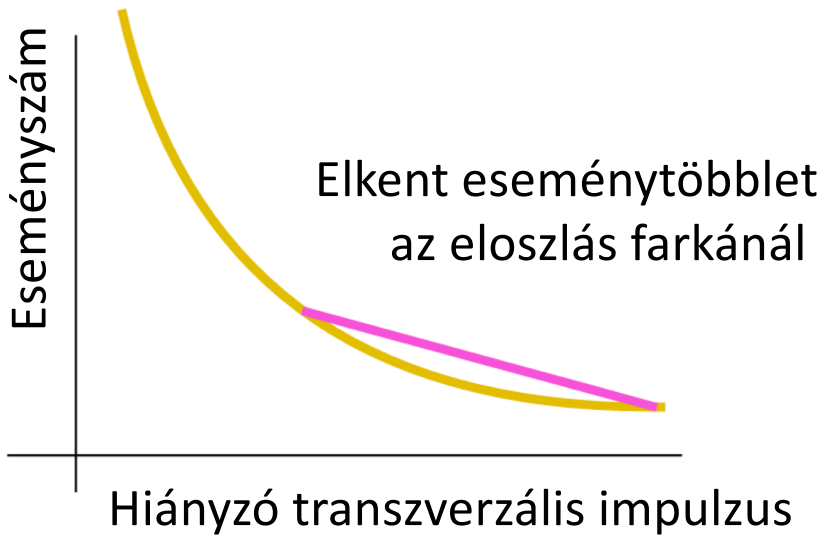
- **CMS @ LHC**
  - Korai SUSY analízisek MC szimulációs előkészítése (Horváth Dezső)
  - Szuperszimmetrikus részecskék keresése
    - Skalár top (Karancsi János, Veszprémi Viktor)
    - Gluino és gaugínó keresés Higgs-bozon + foton végállapotokban (Bartók Márton, Major Péter, PG)
  - Vektorbozon párkeltés vizsgálata, anomális csatolások (PG)

Az Új Fizika nyomában – válogatás

Csúcs vadászat

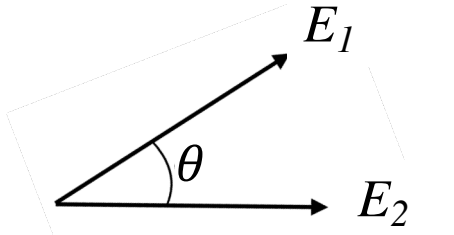


Sötét anyag keresés

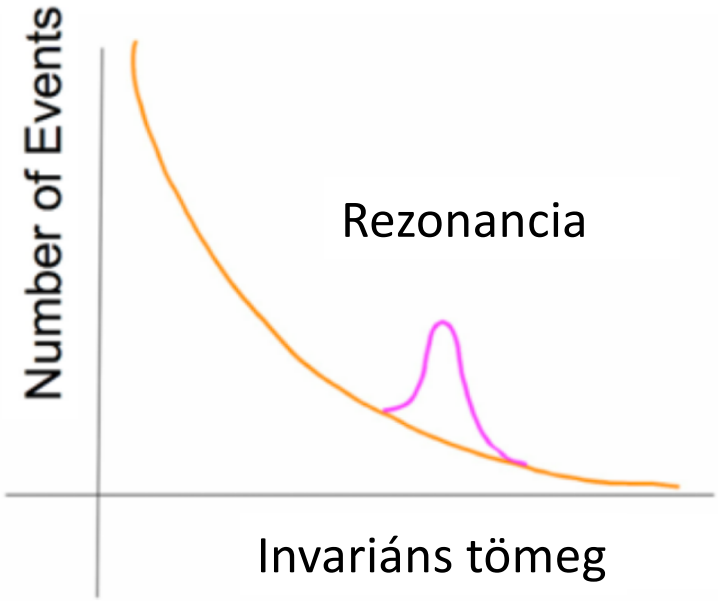


Csúcs vadászat:
nagy tömegű rezonanciák mint az Új Fizika hírnökei

- Objektumpárok keresése adott tömeggel
  (Nobel történetek: J/ψ, Z, H)
- Új energiák elérésekor az első eredmények
- Előfeltétel: detektor és objektum rekonstrukció pontos ismerete
- Jel hiányában, kvázi modell független korlát **σ · Br · A** értéken
- Interpretáció lehetséges sok különböző modellben
- Motiváció:
  - Skalár részecskék
  - Nagy egyesített elméletek mértékbozonjai
  - KK gerjesztések extra dimenziós modellekben
  - Sötét anyag mediátor részecske
  - …

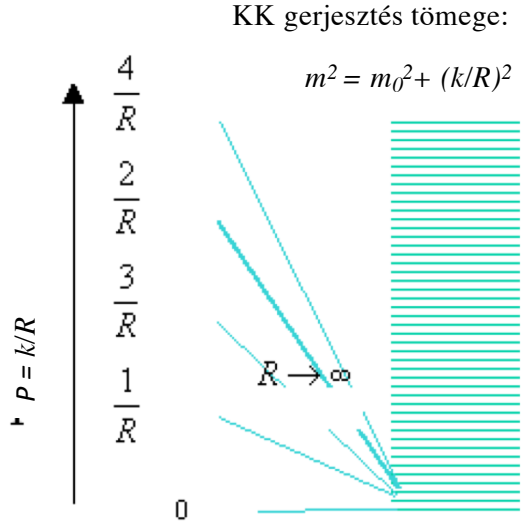


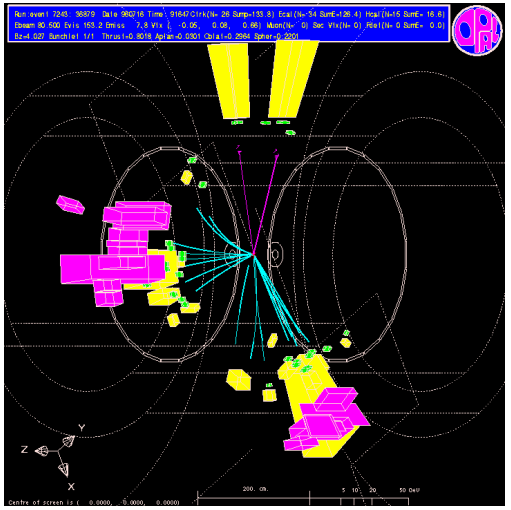
$$M = \sqrt{2E_1E_2(1 - cos\theta)}$$

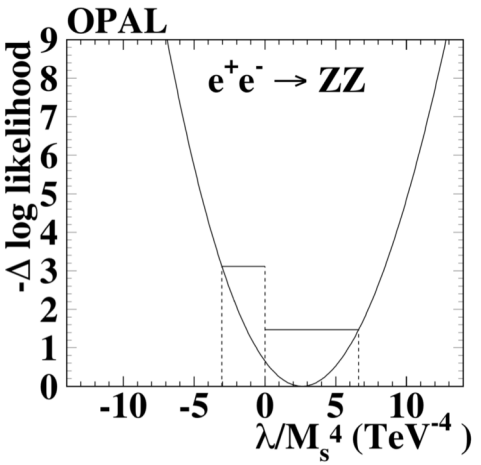


Kaluza-Klein gerjesztések az extra dimenziókból

- Tudományos fantasztikum vagy valóság?
- Motiváció:
  - Húrelmélet “jóslata”
  - Gravitációs kölcsönhatás gyengesége
  - Higgs-bozon természetes tömege
  - Fermion tömegek magyarázata
  - Sötét anyag
  - Szuperszimmetria sértés
- Az extra dimenziókban is terjedő SM részecskék magasabb tömegű gerjesztett állapotai megjelenhetnek
  - A tömegspektrum az extra dimenziók geometriájától függ
- Első eredmények már a LEP-en lepton és bozon párok vizsgálatával
  - Tipikusan ~1 TeV korlát a tömegskálán
    (ADD UV levágás M_s ~ Planck skála D dimenzióban M_D)

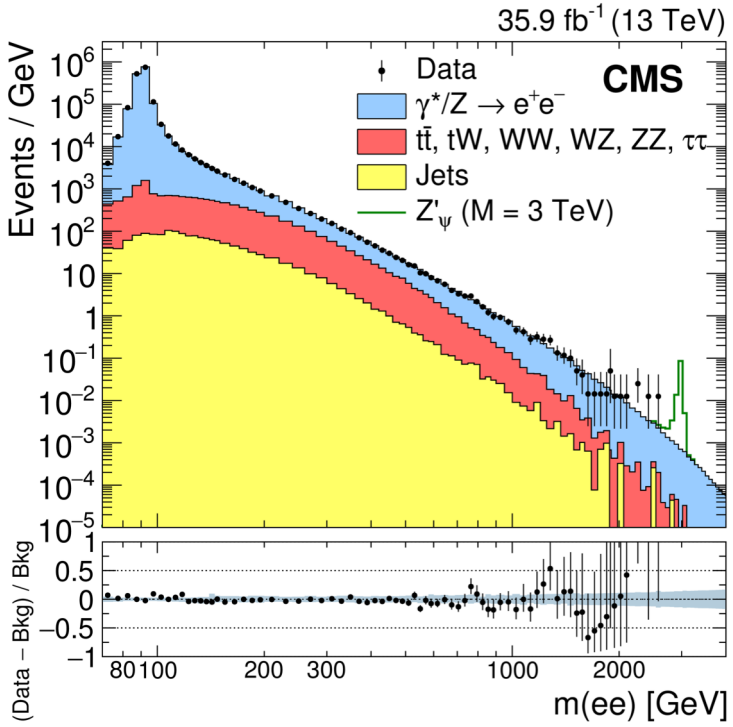


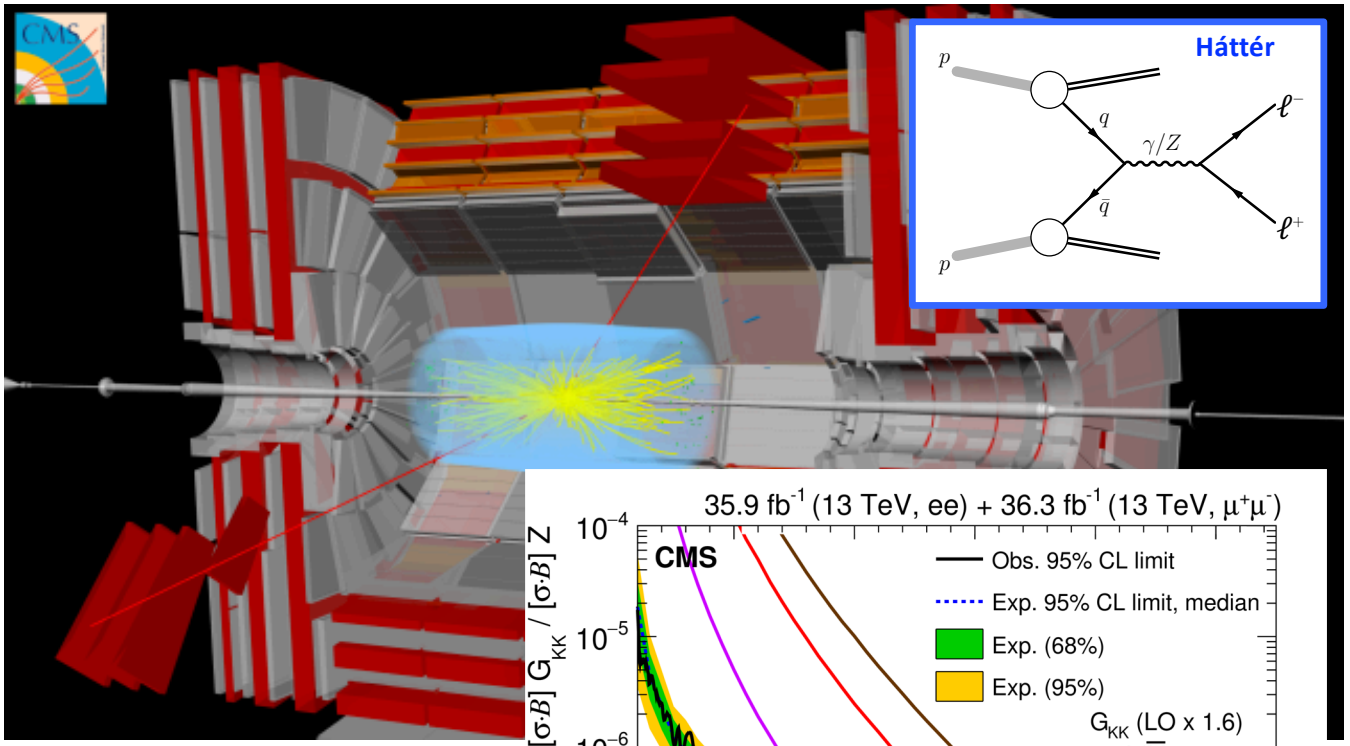


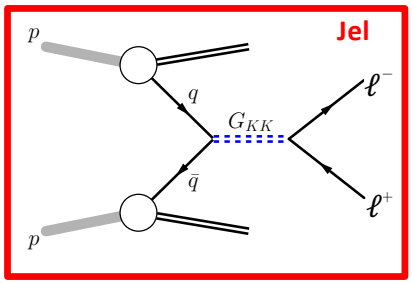


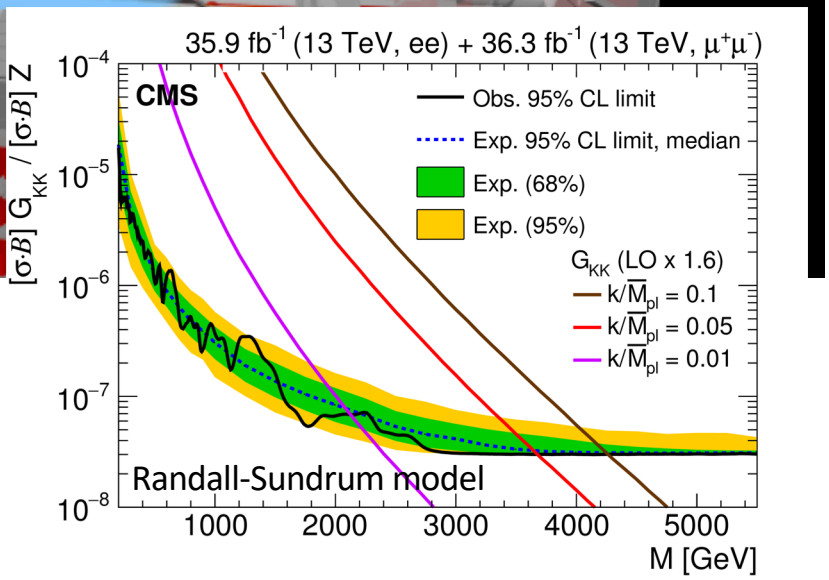
Extra dimenziók nyomában

Rezonancia keresés a két-lepton tömegspektrumban

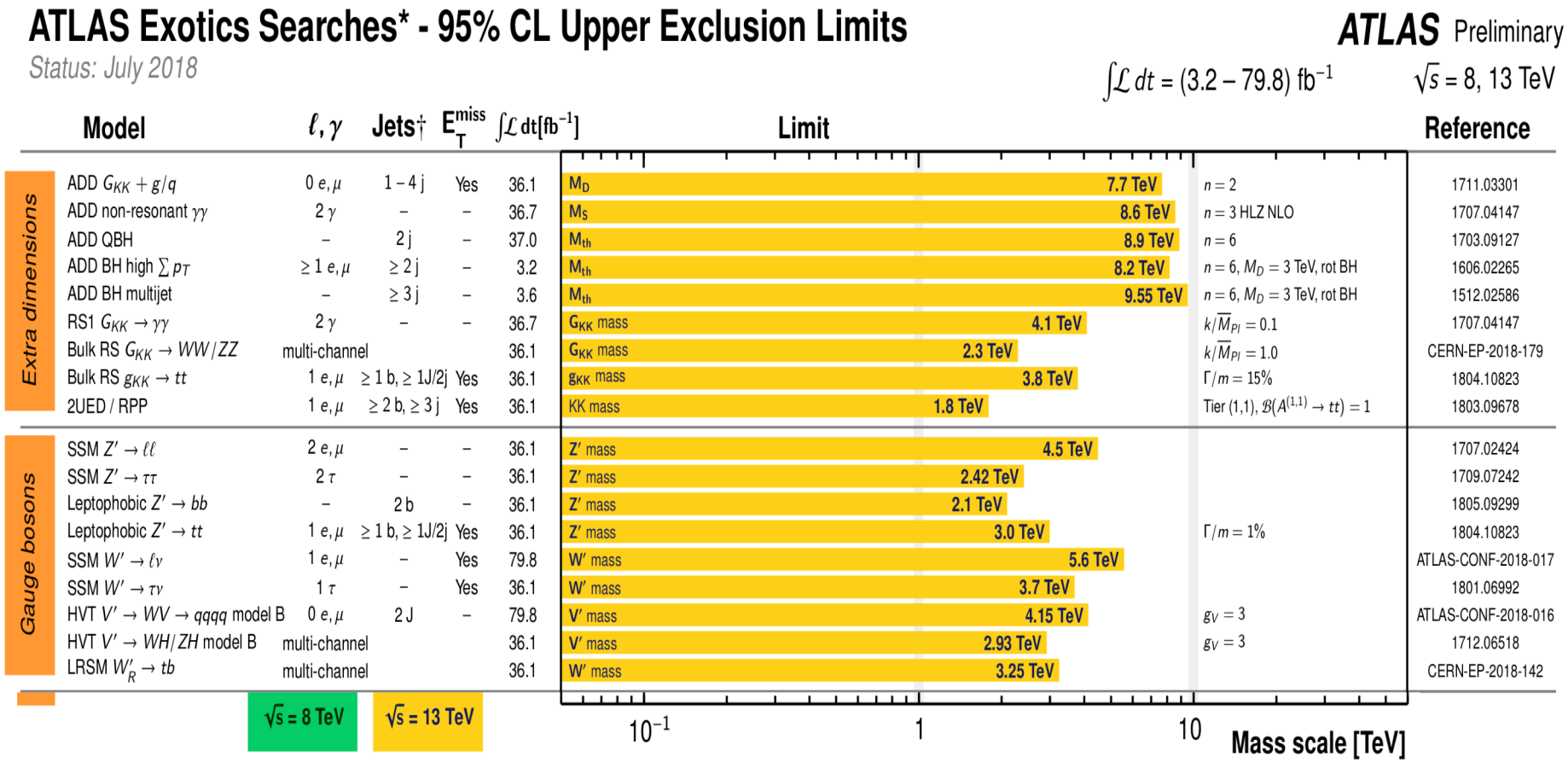








Extra dimenziók és mértékbozonok: korlátok

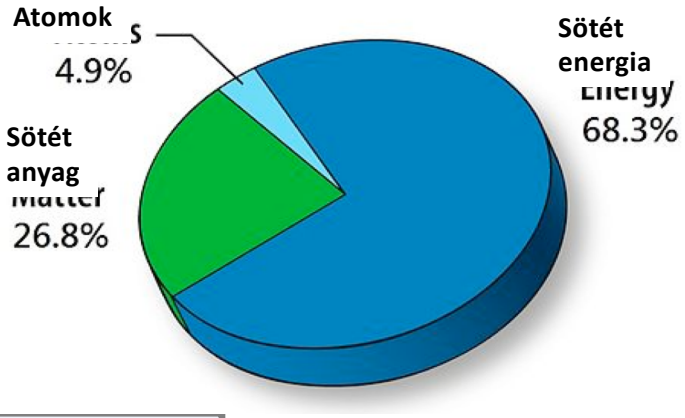


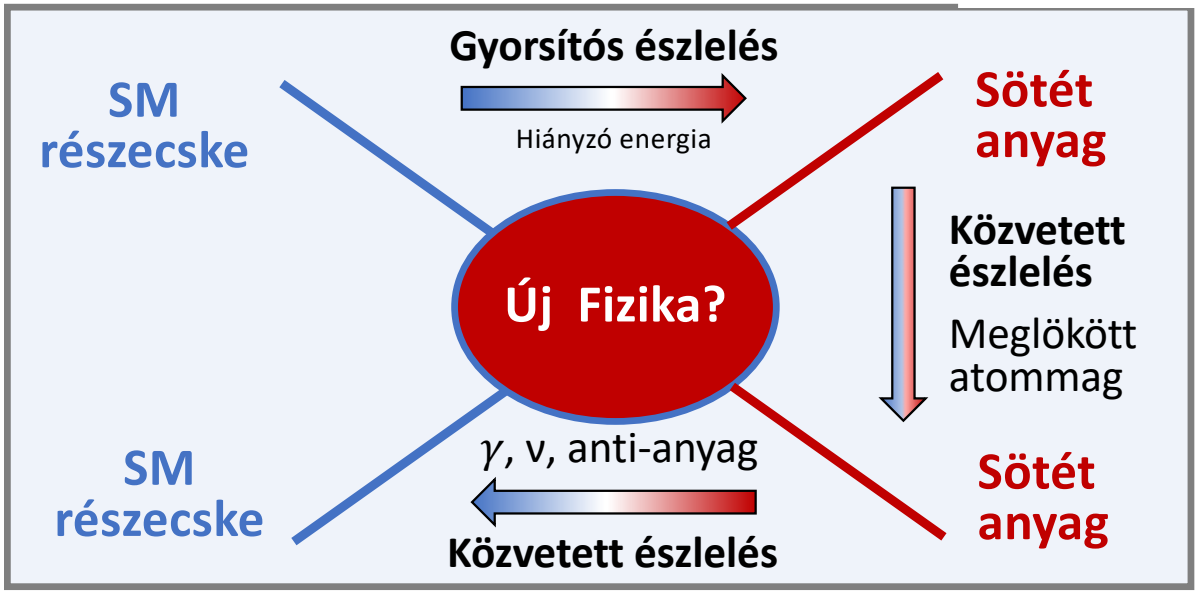
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

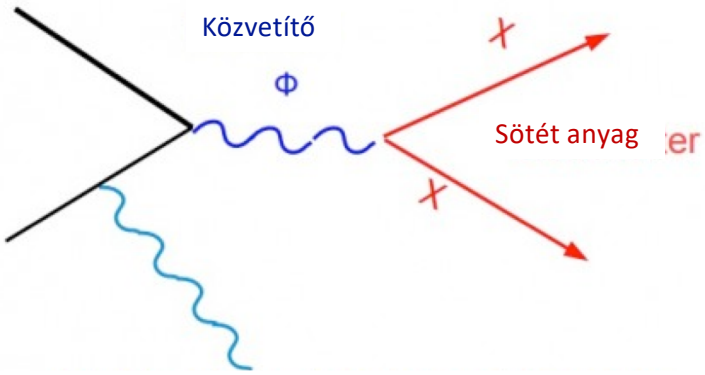
Rejtélyes sötét anyag

- Kozmológiai mérésekben gravitációs hatásán keresztül
- Elektromosan nem sugároz, “sötét”
- Részt vehet gyenge kölcsönhatásban
- “Nem-barionos” sötét anyag jelöltek
  - Gyengén kölcsönható nehéz részecskék (pl. SUSY részecskék)
  - Steril neutrínók
  - Axionok





Sötét anyag nyomában az LHC-n

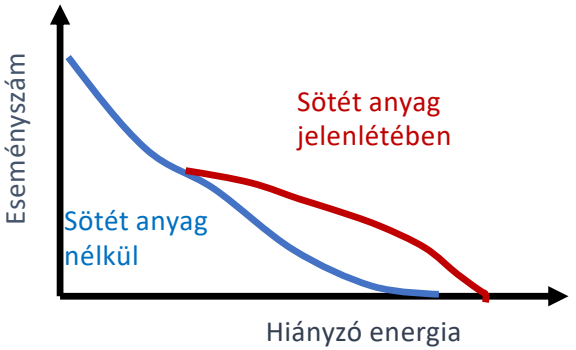


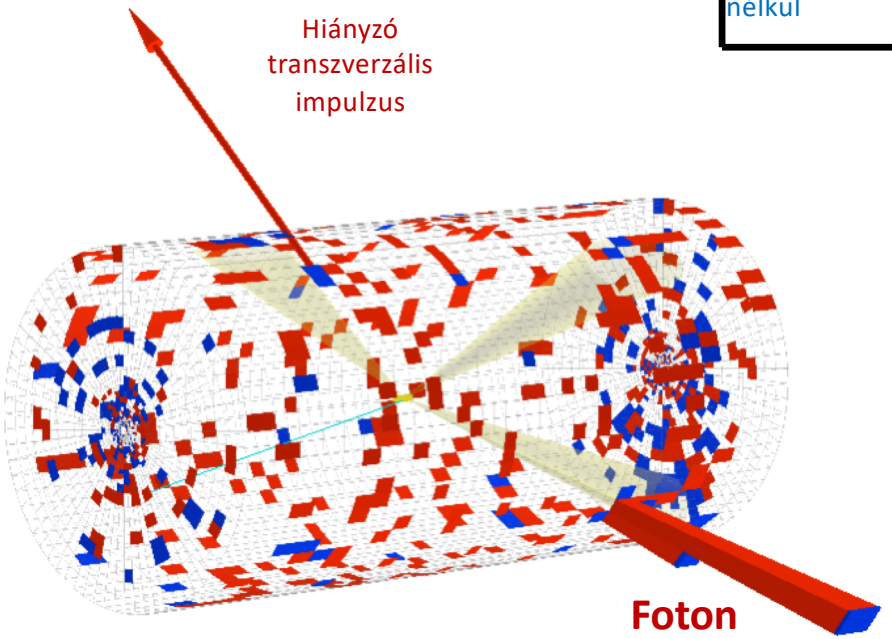
Kisugárzott részecske
(foton, W, Z, Higgs-bozon, gluon),
hogy észrevegyük az eseményt

Sötét anyag gyengén kölcsönható,
nem lép kölcsönhatásba a detektorral
→ hiányzó impulzus (energia)

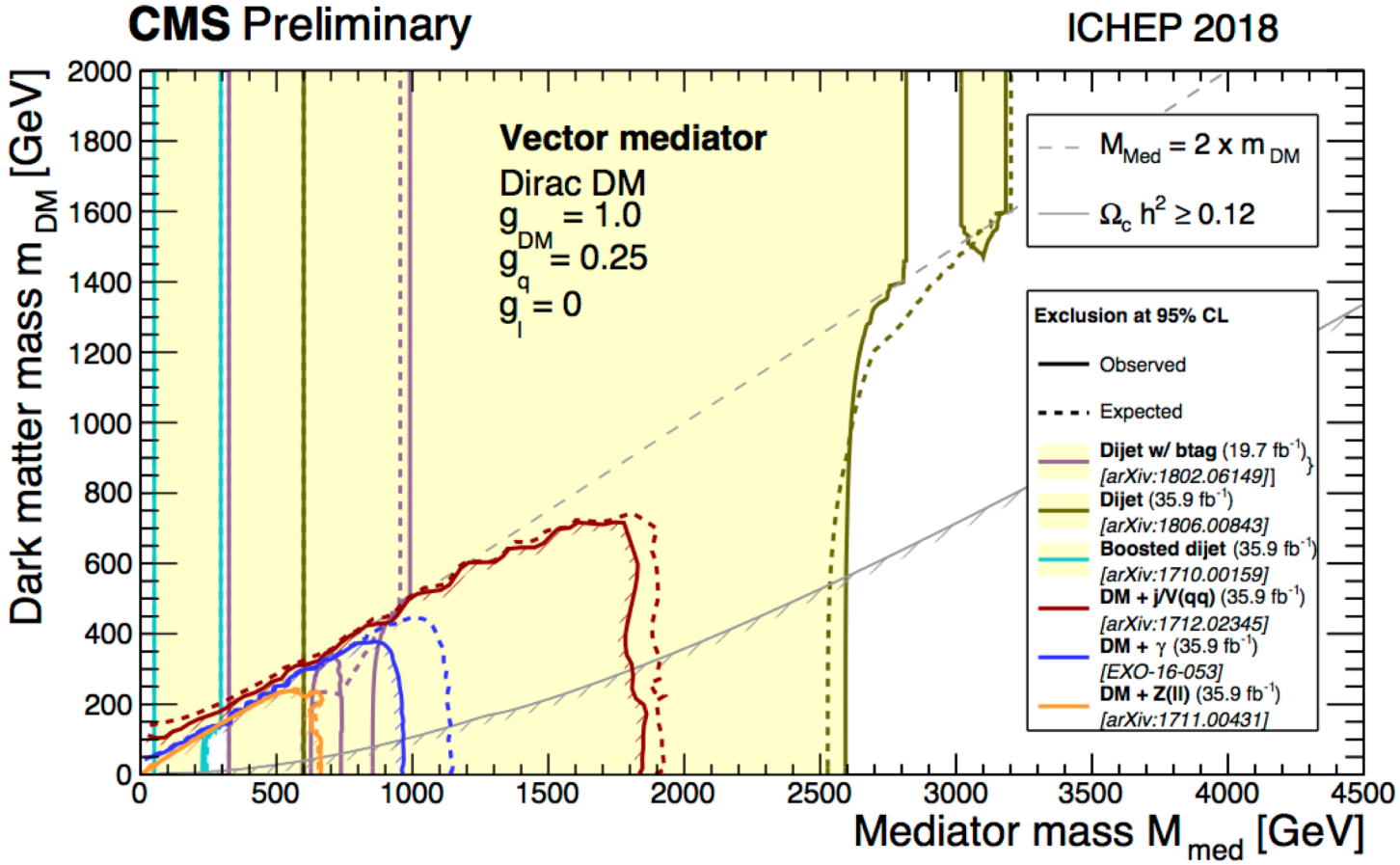
Energia- és impulzus megmaradásból:

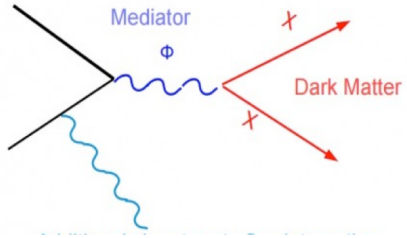
$E_{\text{hiányzó}} = |\Sigma \boldsymbol{p}_{\text{mért}}|$





Sötét anyag: korlátok



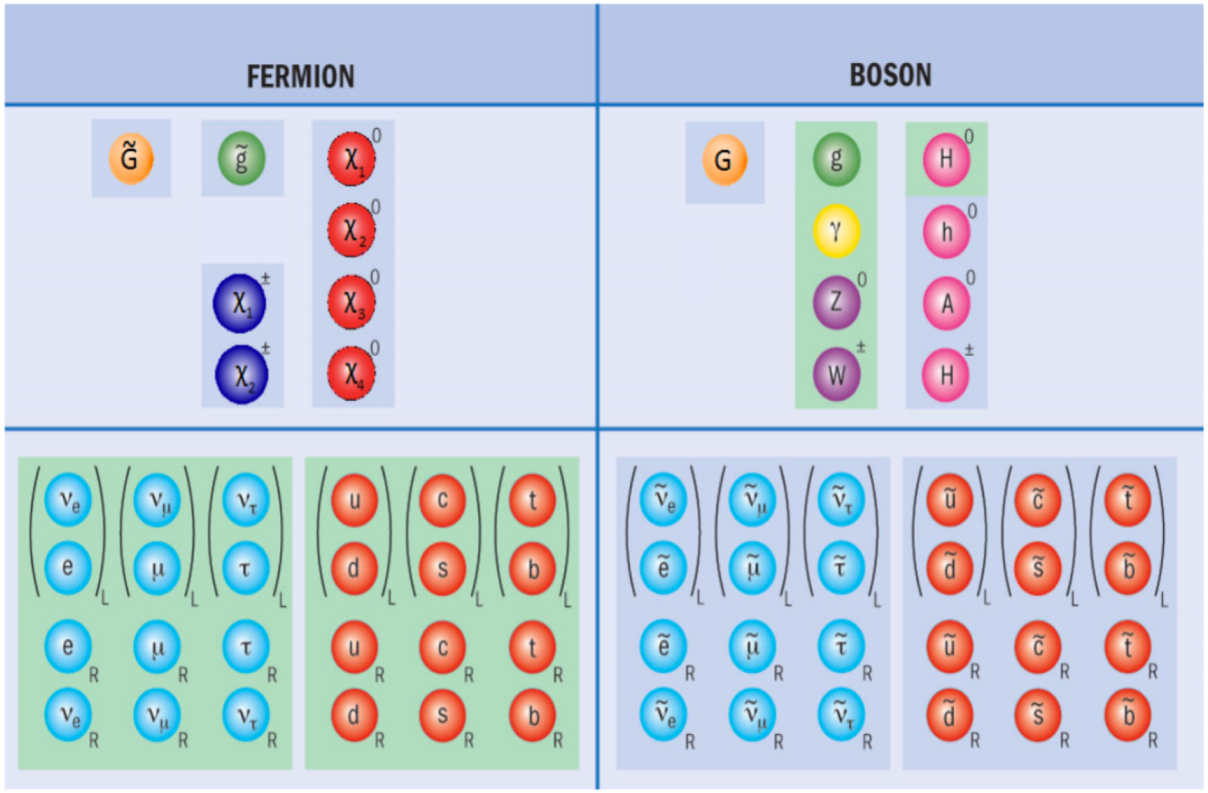


Kompetitív a közvetlen keresések korlátjaival

Jelentős erőfeszítések a két módszer eredményeinek összevetésére, közös keretbe foglalására

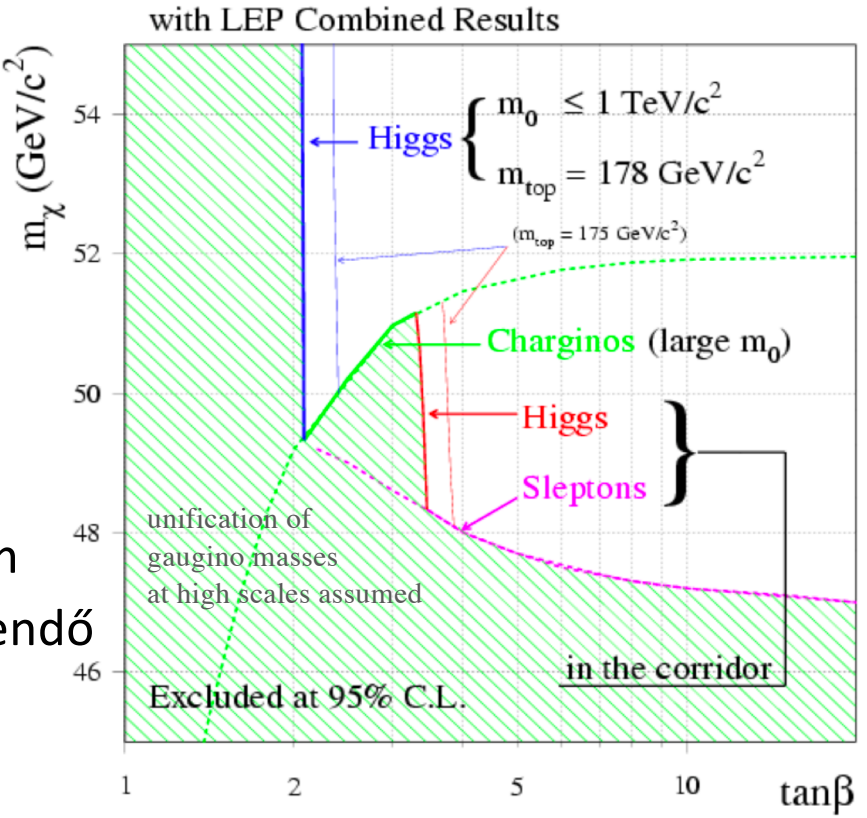
Szuperszimmetria (SUSY)

- Szimmetria a bozonikus es fermionikus állapotok között
- A Standard Modell jól definiált kiterjesztésehez vezet
  - SUSY részecskék SM társaikkal azonos szuper-multiplettben → azonos kvantumszámok a SM mértékcsoportokra
  - SM és SUSY részecskék dimenziótlan csatolása megadható ismert SM mérték és Yukawa csatolásokkal
- Az elemi részecskék száma a ”minimális” modellben is megduplázódik → nem “gazdaságos”



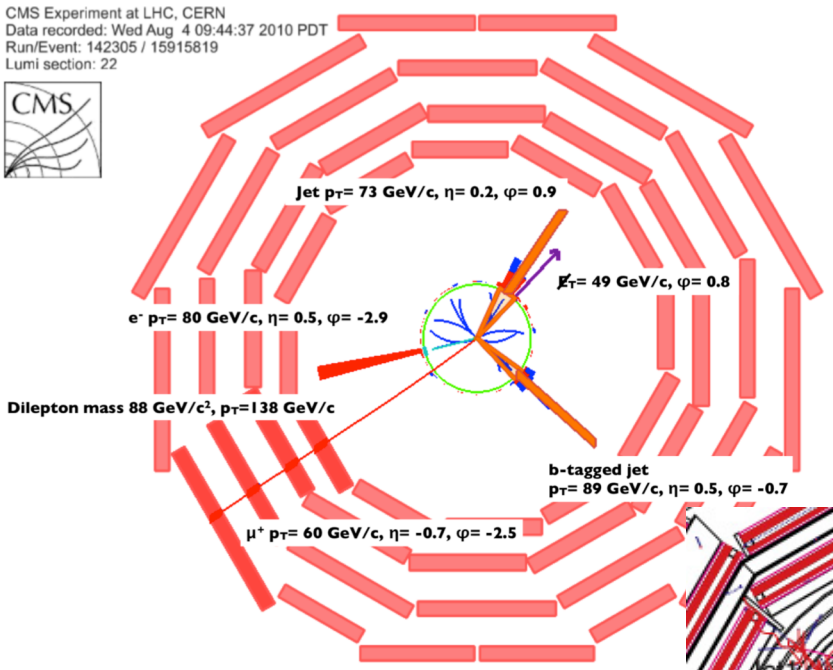
Szuperszimmetria (SUSY)

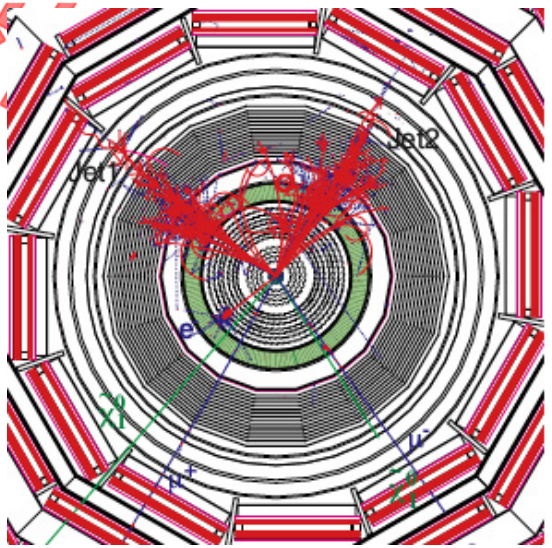
- Jól motivált
  - Poincaré algebra nem triviális kiterjesztése
  - Húrelmélet ”jóslata”
  - Sötét anyag jelölt
  - Mértékcsatolás egyesítés
  - EW skála védelme a SM és SUSY részecskék kvantumkorrekcióinak kioltásával
- SUSY sérül: SUSY részecskék tömege függ a sértés nem ismert több mint 100 parameterétől, kísérletileg mérendő
  - **LEP:** SUSY részecskék tömege $\gtrsim$ 100 GeV, kivéve a bínóé, mivel az nem csatolódik a mértékbozonokhoz
  - B-gyárak, precíziós mérések közvetett korlátokat adnak
  - **LHC:** szigorú korlátok az erős kölcsönhatásban résztvevő részecskék tömegeire, elektrogyenge szektor nehezebben érhető el → HL-LHC adata fontos a felderítéshez



Szuperszimmetrikus részecskék

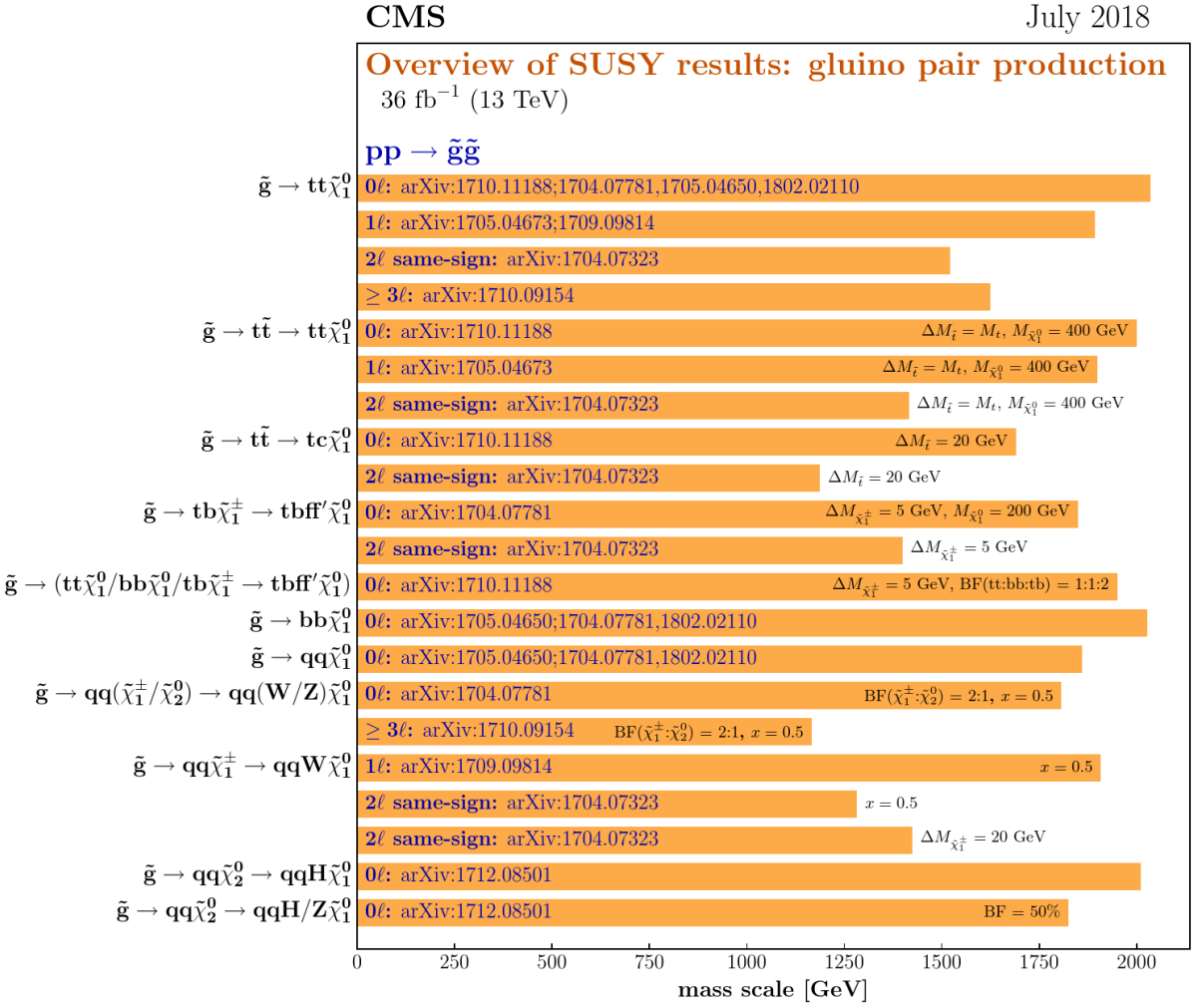
- Komplex folyamatok, végállapotok
- LHC SUSY stratégia:
  egyszerűsített modellekkel kötjük össze a kísérleti eredményeket és az elméleti interpretációt
- Kevés SUSY részecske és kölcsönhatás → könnyű MC szimulációt készíteni
  - Részecske tömegek, keletkezési hatáskeresztmetszetek (σ), bomlási ágarányok (Br)
- Jel hiányában, kvázi modell független **korlát σ·Br** értéken a részecsketömegek függvényében
  - Alkalmazható olyan modellekben, ahol a vizsgált folyamat lejátszódik
- **Tömegkorlátok egyszerűsített modellekből nem általános érvényűek**





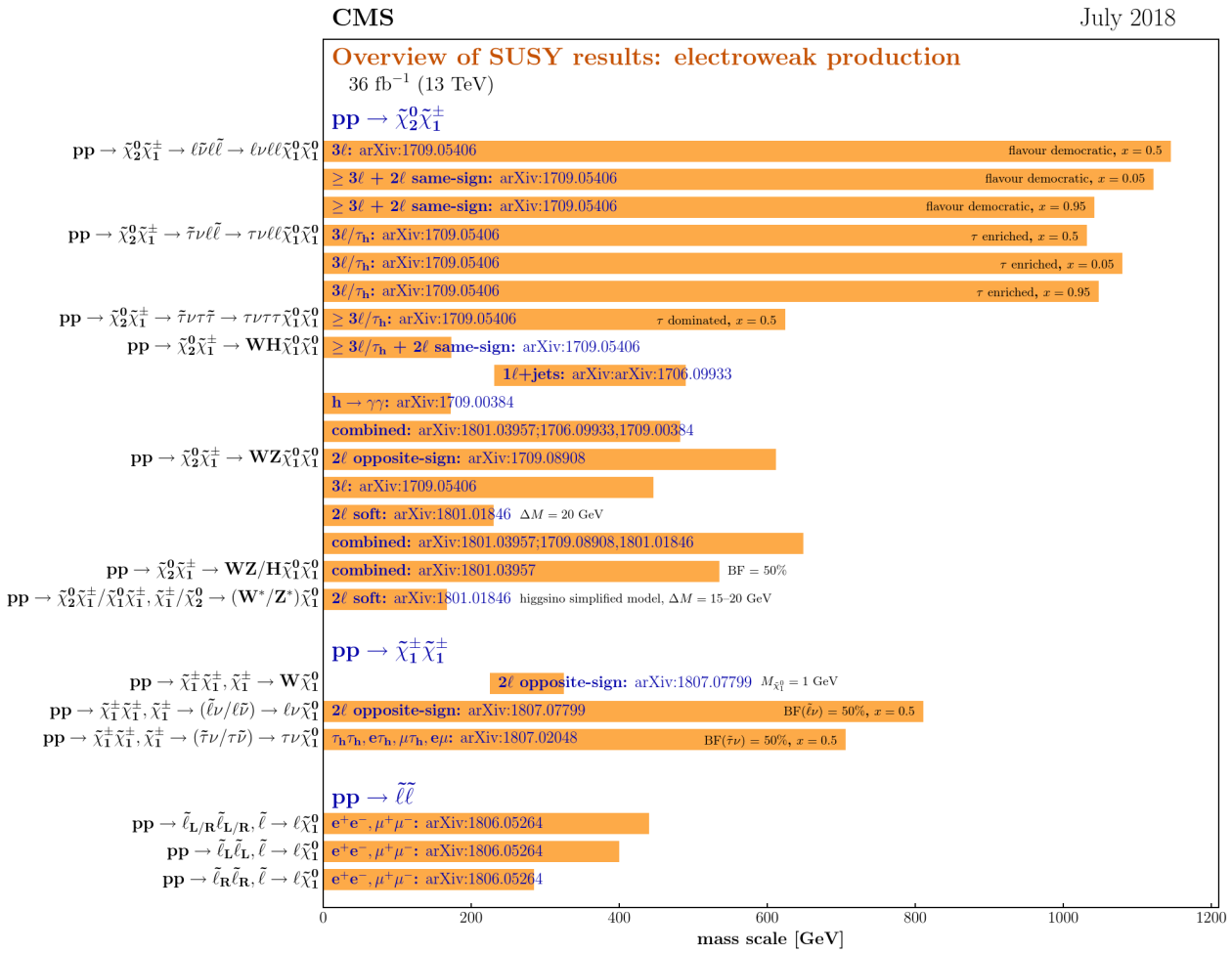
Szuperszimmetrikus részecskék

- Komplex folyamatok, végállapotok
- LHC SUSY stratégia:
  egyszerűsített modellekkel kötjük össze a kísérleti eredményeket és az elméleti interpretációt
- Kevés SUSY részecske és kölcsönhatás → könnyű MC szimulációt készíteni
  - Részecske tömegek, keletkezési hatáskeresztmetszetek (σ), bomlási ágarányok (Br)
- Jel hiányában, kvázi modell független **korlátok σ·Br** értéken a részecsketömegek függvényében
  - Alkalmazható olyan modellekben, ahol a vizsgált folyamat lejátszódik
- **Tömegkorlátok egyszerűsített modellekből nem általános érvényűek**



Selection of observed limits at 95% C.L. (theory uncertainties are not included). Probe **up to** the quoted mass limit for light LSPs unless stated otherwise. The quantities ΔM and x represent the absolute mass difference between the primary sparticle and the LSP, and the difference between the intermediate sparticle and the LSP relative to ΔM, respectively, unless indicated otherwise.

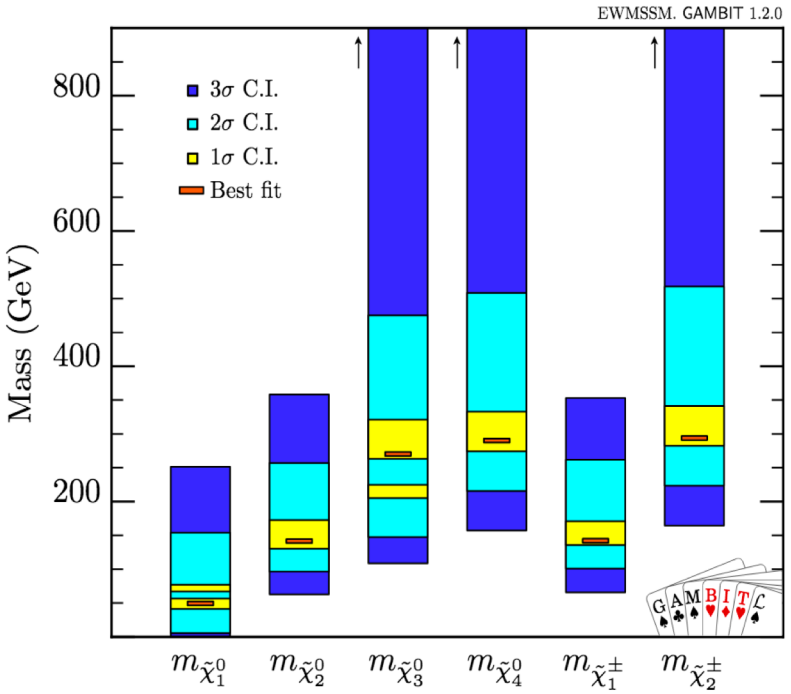
Egyszerűsített modellek vs. globális SUSY modell illesztés



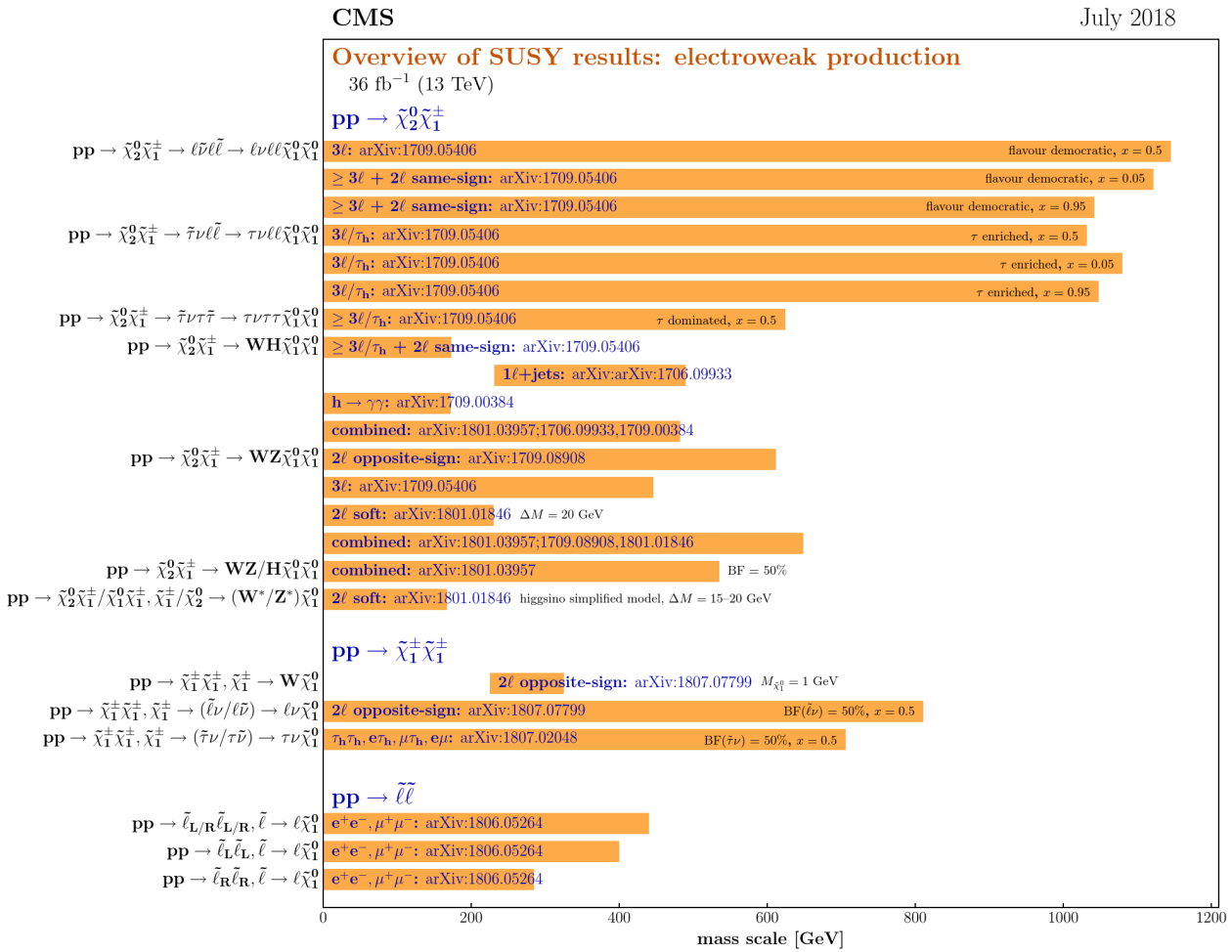
Selection of observed limits at 95% C.L. (theory uncertainties are not included). Probe **up to** the quoted mass limit for light LSPs unless stated otherwise. The quantities ΔM and x represent the absolute mass difference between the primary sparticle and the LSP, and the difference between the intermediate sparticle and the LSP relative to ΔM, respectively, unless indicated otherwise.

Szétcsatolási régió, EWMSSM

Paraméterek:
M_1 bínó tömeg, M_2 wínó tömeg,
μ Higgsínó tömeg paraméter, tanβ



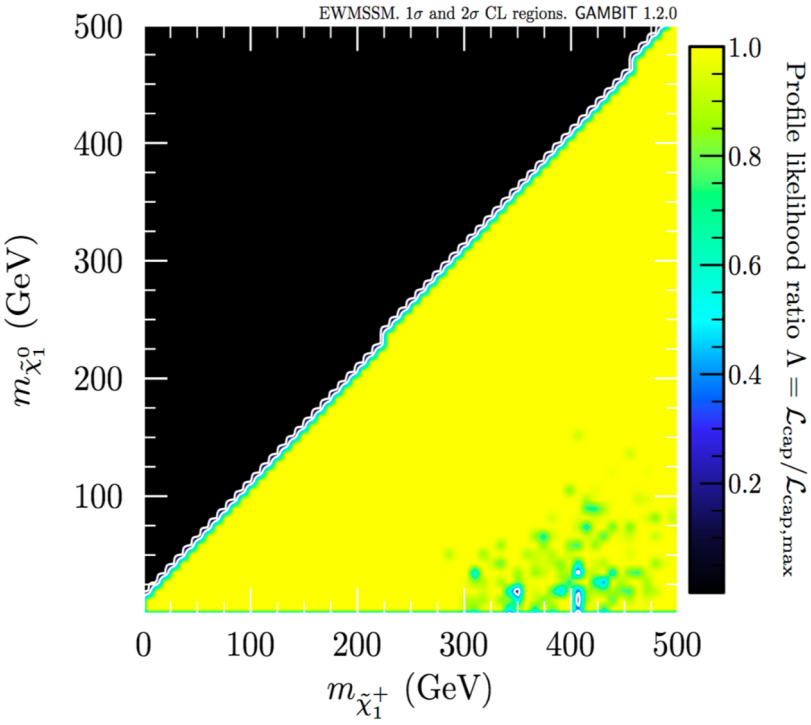
Egyszerűsített modellek vs. globális SUSY modell illesztés



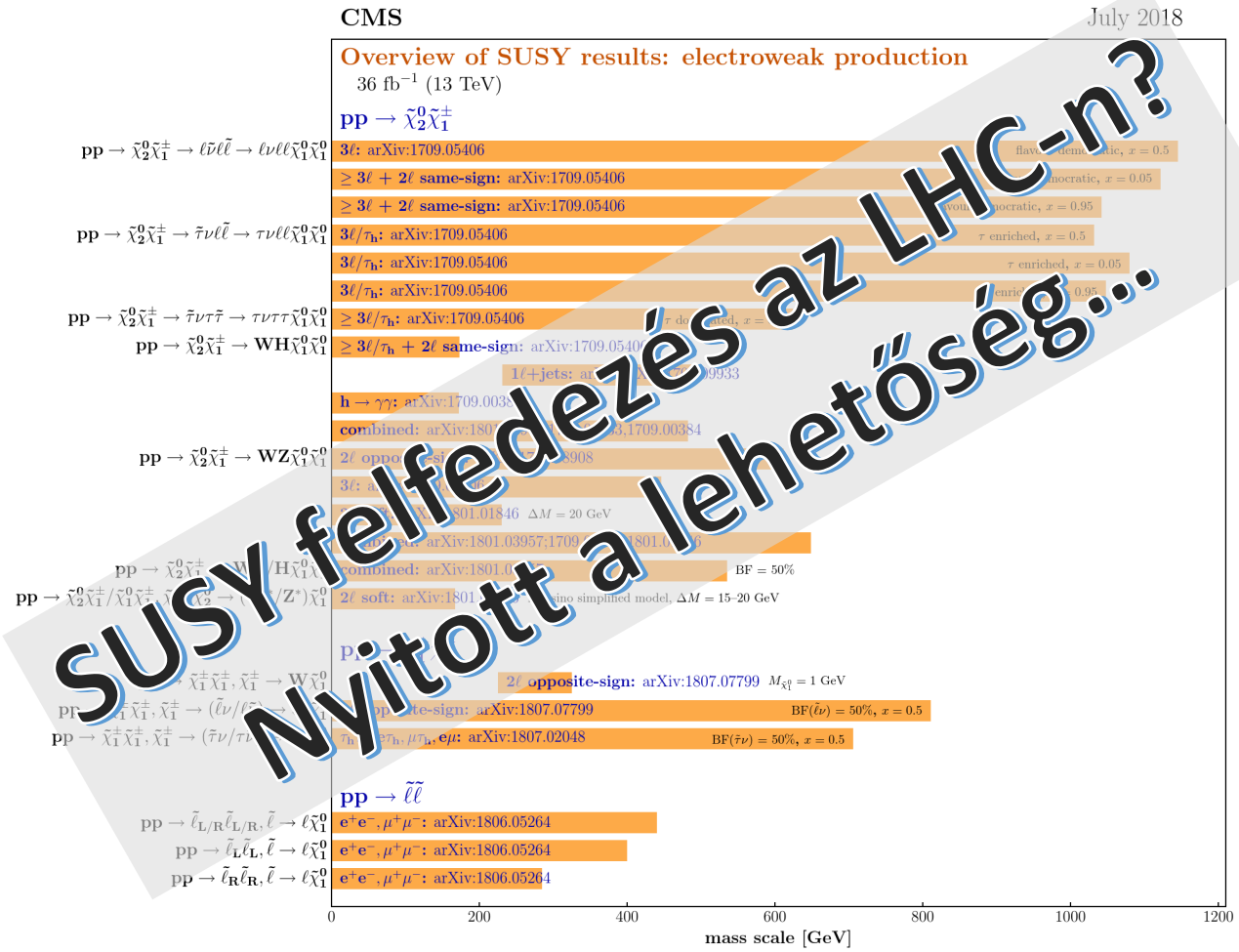
Selection of observed limits at 95% C.L. (theory uncertainties are not included). Probe **up to** the quoted mass limit for light LSPs unless stated otherwise. The quantities ΔM and x represent the absolute mass difference between the primary sparticle and the LSP, and the difference between the intermediate sparticle and the LSP relative to ΔM, respectively, unless indicated otherwise.

Szétcsatolási régió, EWMSSM

Paraméterek:
M_1 bínó tömeg, M_2 wínó tömeg,
μ Higgsínó tömeg paraméter, tanβ



Egyszerűsített modellek vs. globális SUSY modell illesztés

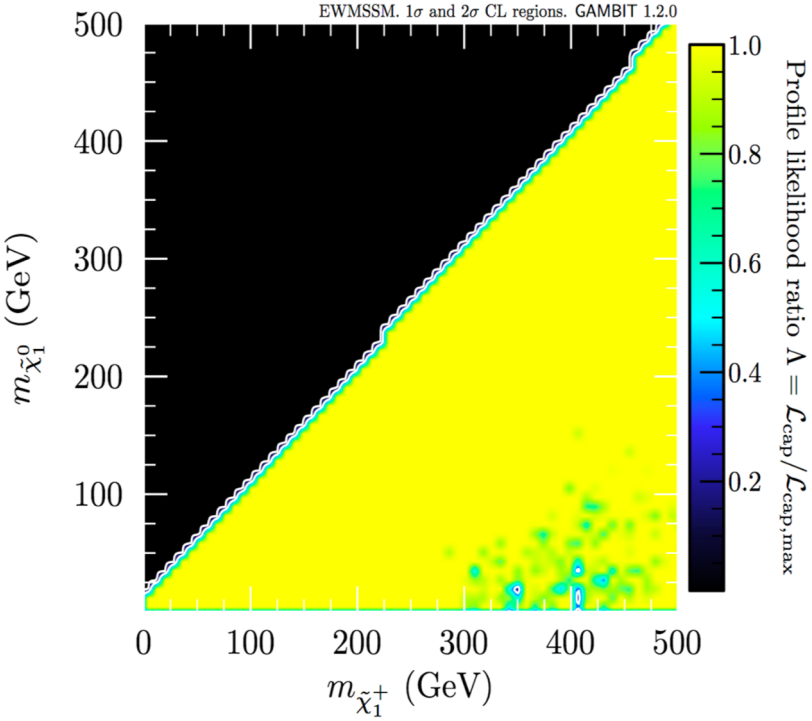


Selection of observed limits at 95% C.L. (theory uncertainties are not included). Probe **up to** the quoted mass limit for light LSPs unless stated otherwise. The quantities ΔM and x represent the absolute mass difference between the primary sparticle and the LSP, and the difference between the intermediate sparticle and the LSP relative to ΔM, respectively, unless indicated otherwise.

SUSY felfedezés az LHC-n?
Nyitott a lehetőség...

Szétcsatolási régió, EWMSSM

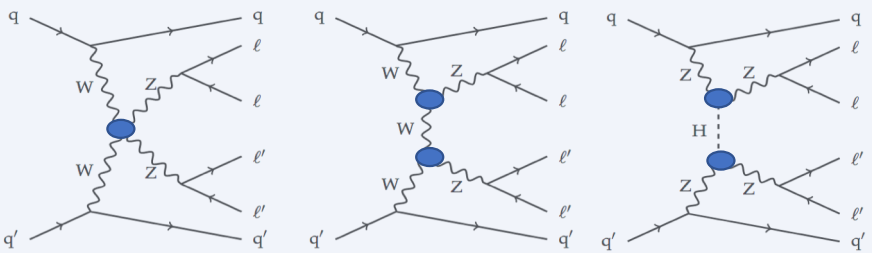
Paraméterek:
M_1 bínó tömeg, M_2 wínó tömeg,
μ Higgsínó tömeg paraméter, tanβ



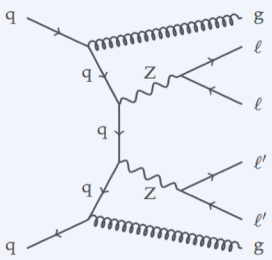
Anomális csatolások

- Ha az Új Fizika energiaskálája nem érhető el kinematikailag az LHC-n, SM precíziós (pl. differenciális hatáskeresztmetszet) mérések árulkodhatnak létéről
- Vektorbozon szórás különösen érzékeny az elektrogyenge szektorban új jelenségekre
  - A Higgs-tér nem csak az elemi részecskék tömegének forrása a SM-ben, de a gyenge vektorbozon szórás hatáskeresztmetszetét is regularizálja
  - Új Fizika anomális csatolásként jelentkezhet
  - Kimutatható magas energiájú objektumok eloszlásának vizsgálatával

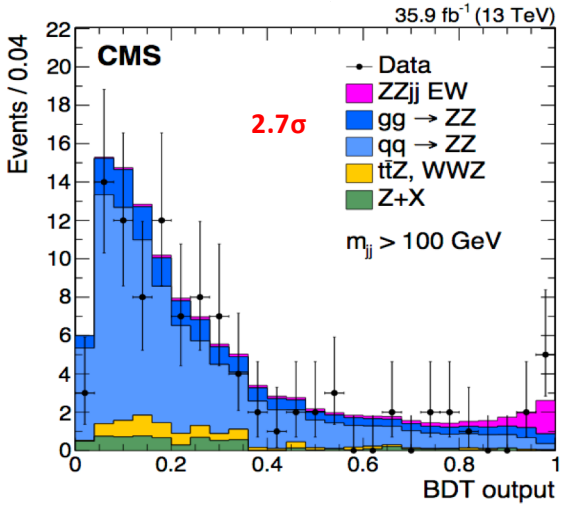
ZZ szórás ritka elektrogyenge folyamat

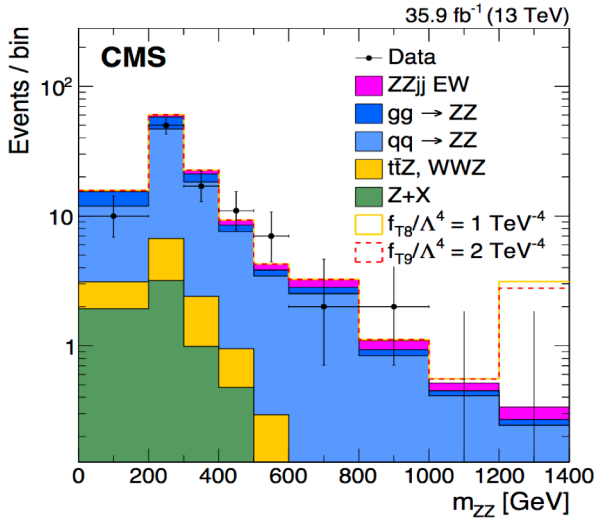


Mérését a jelentős háttér nehezíti

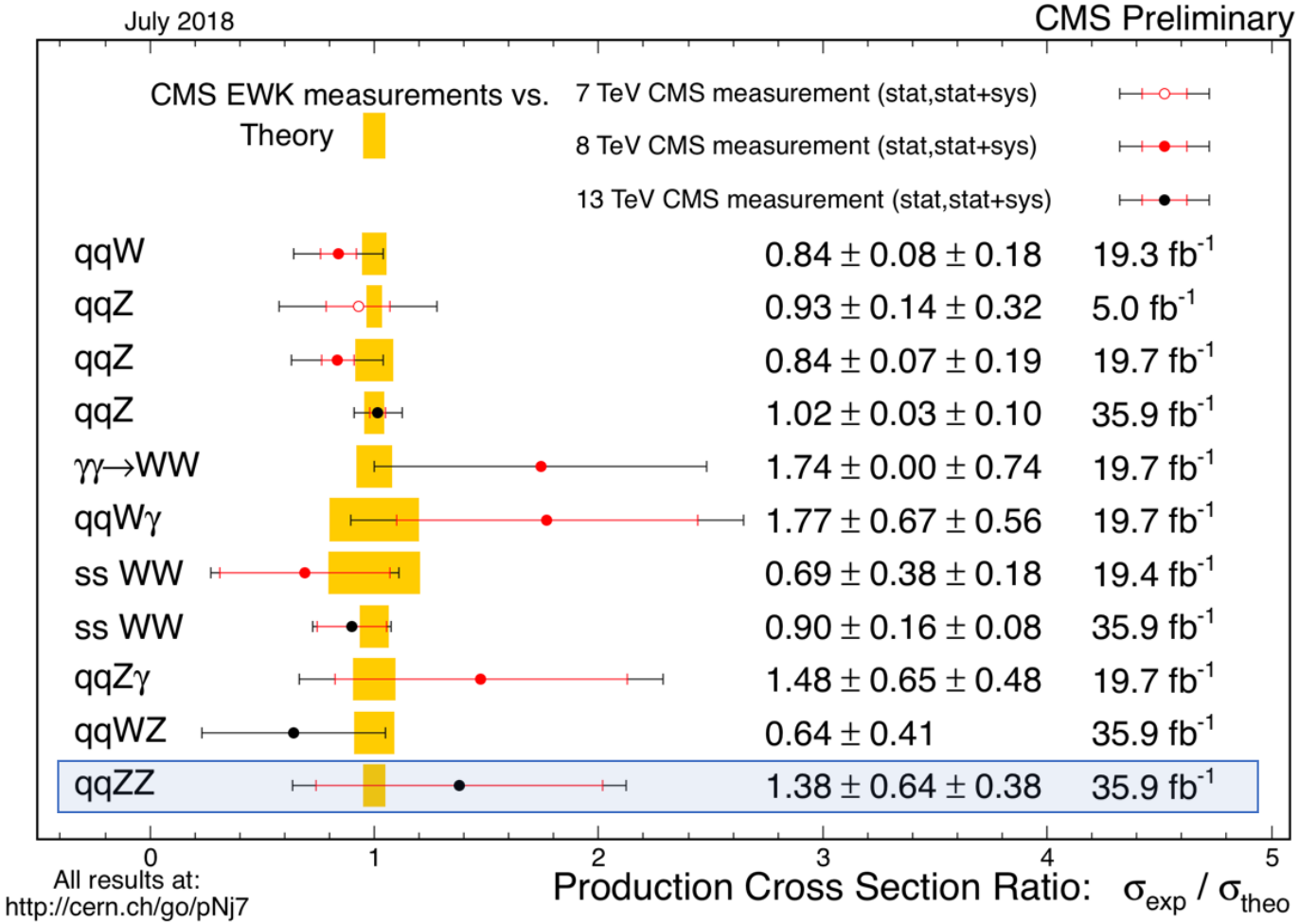


HL-LHC adatai fontosak





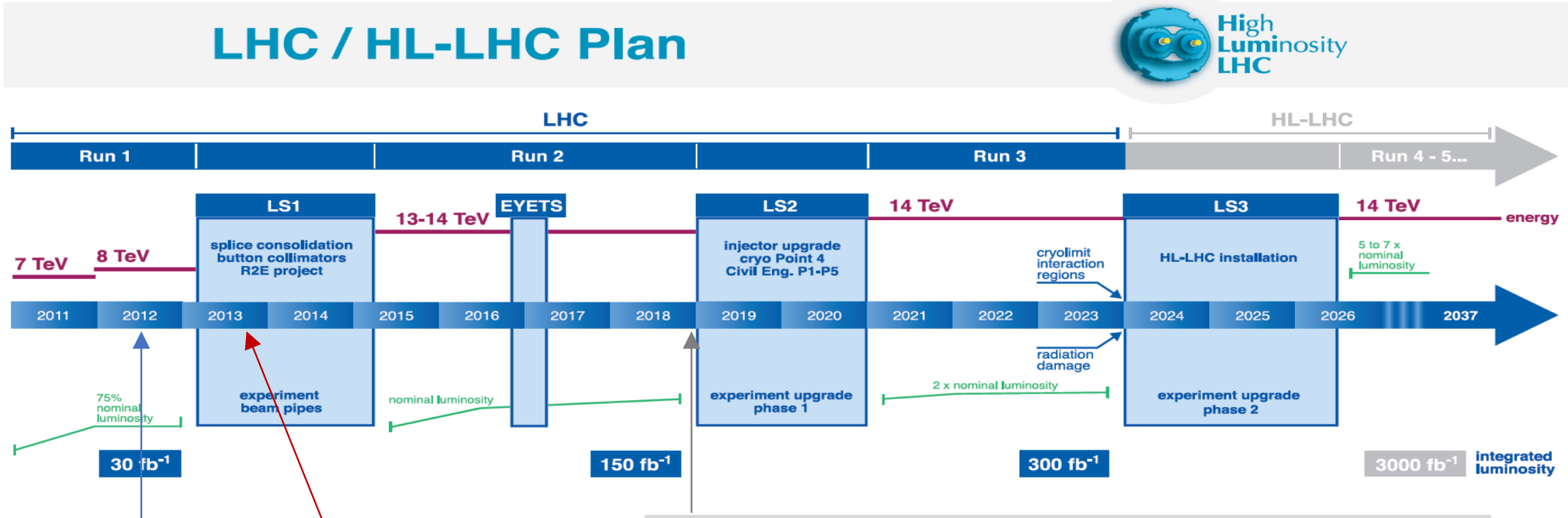
Vektorbozon szórás és anomális csatolások

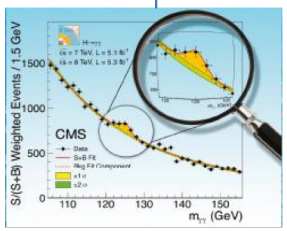


Statisztikailag korlátozott mérés

HL-LHC jelentős javulást hoz majd

Kitekintés





Higgs felfedezés



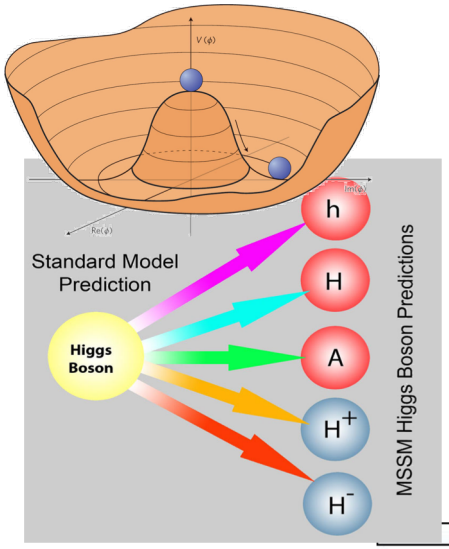
Higgs, Englert
Nobel-díj

Még csupán az elején járunk az LHC programnak
Az adatok 5% rögzítettük, 2-3%-át dolgoztuk fel

2020 körül teljes Run2 adatmintán alapuló publikációk
Felkészülés a gyorsító és a detektorok tovább fejlesztésére

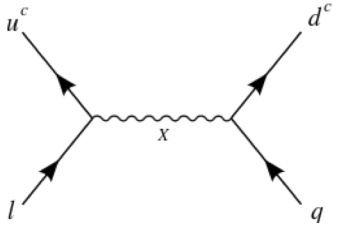
Rengeteg új eredmény (és - reményeink szerint - új felfedezés) vár ránk az LHC és a HL-LHC adataiban

Mi vár ránk a Standard Modell mögött?

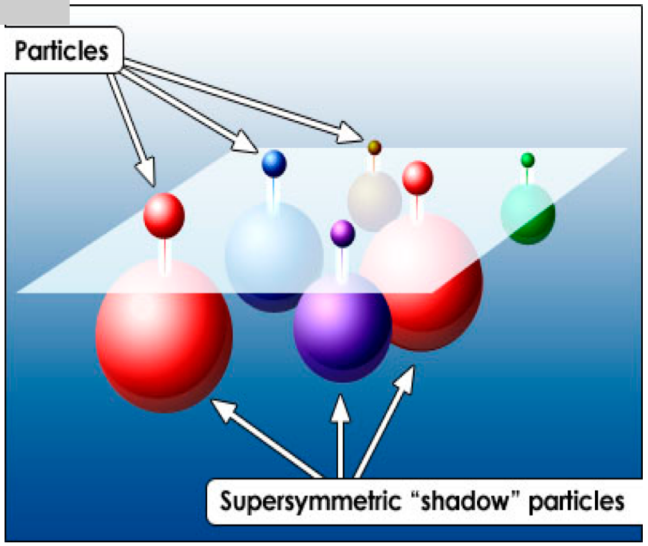


Új Higgs-részecske?

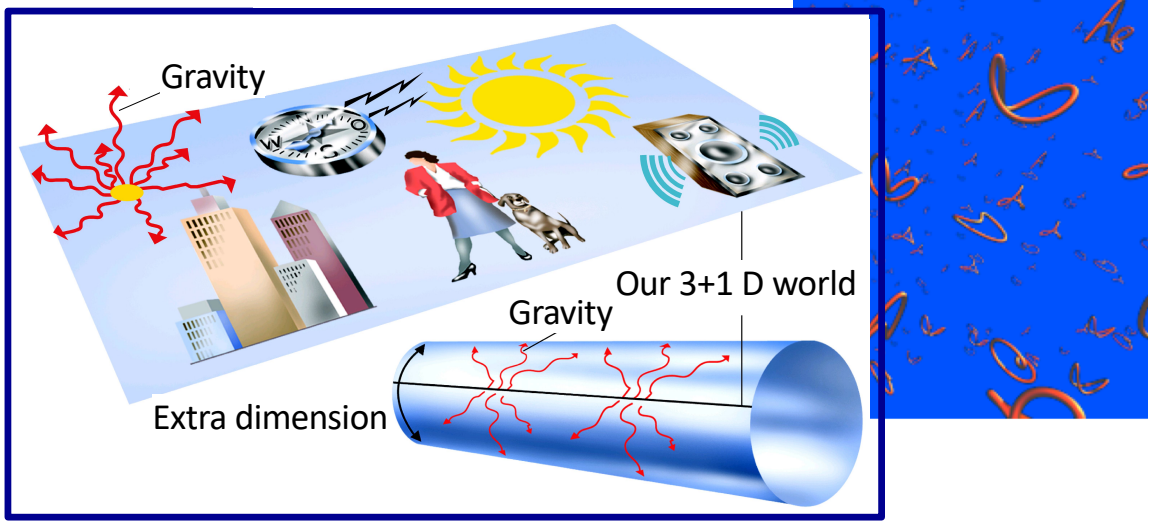
Új kölcsönhatások?



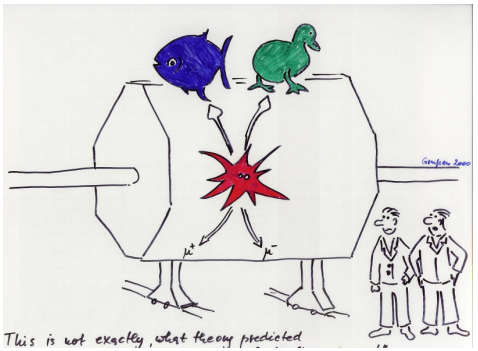
Szuperszimmetria?



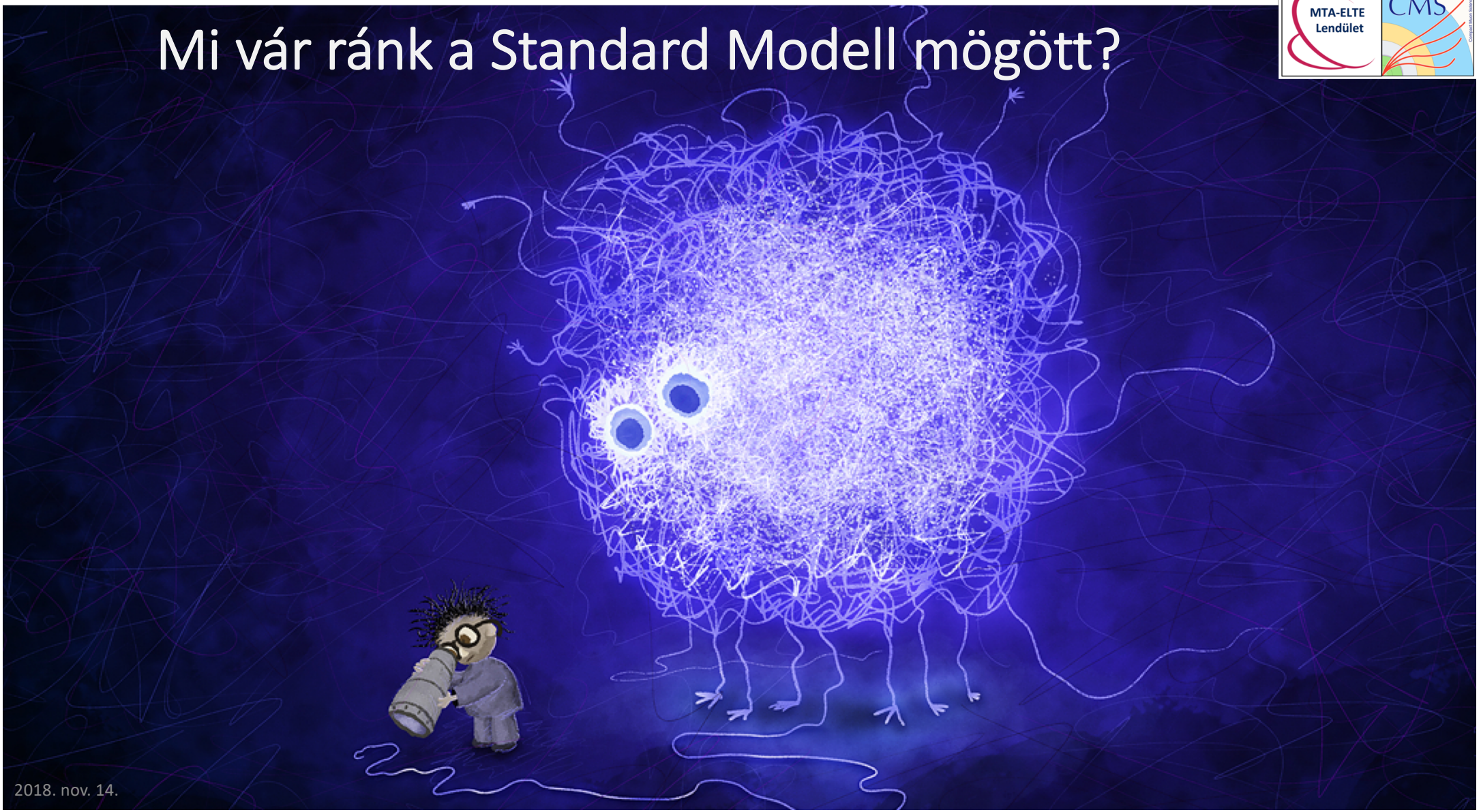
További térbeli dimenziók?



Nem várt meglepetés?



Mi vár ránk a Standard Modell mögött?

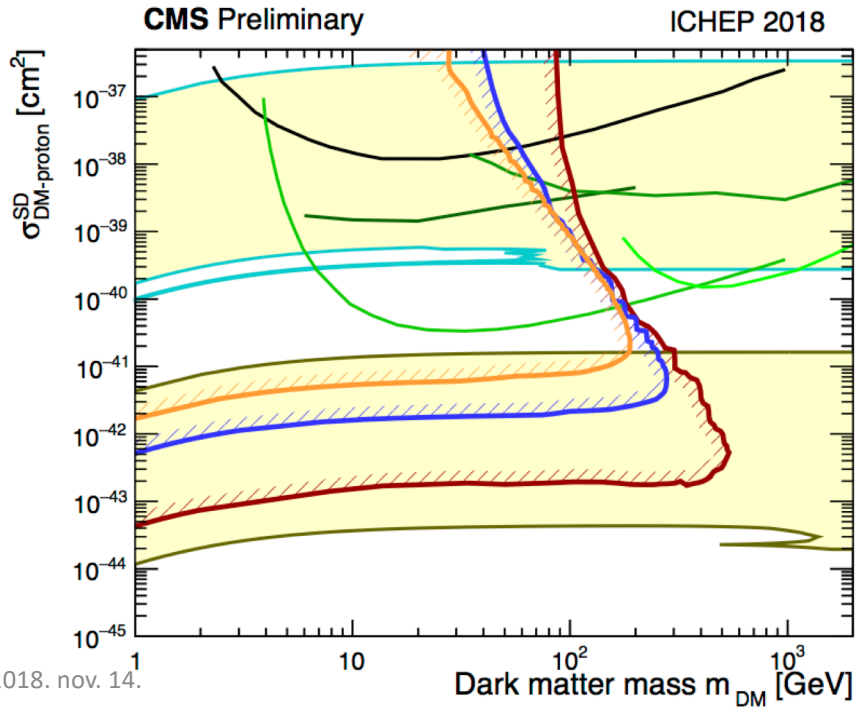


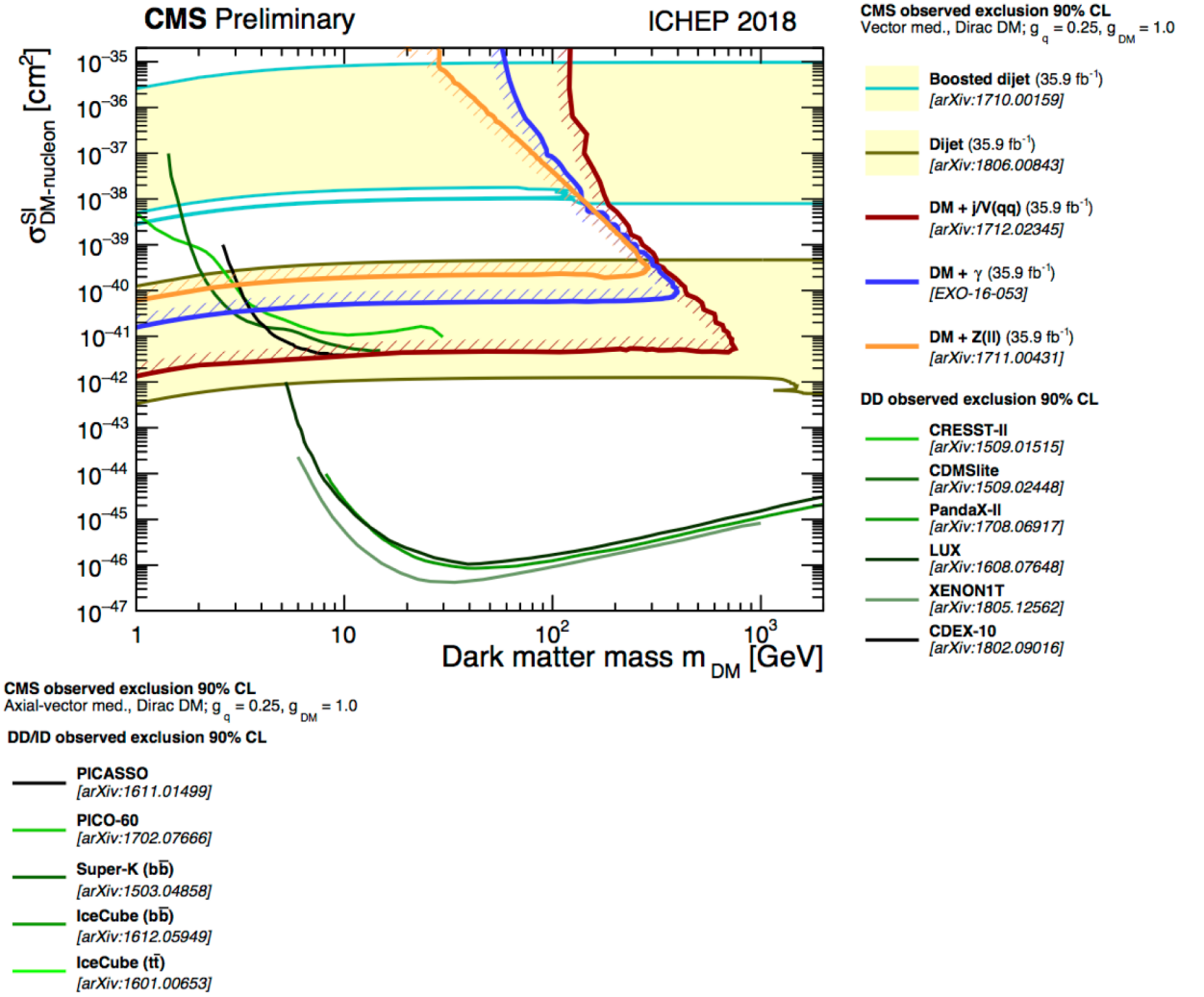
2018. nov. 14.

Extra

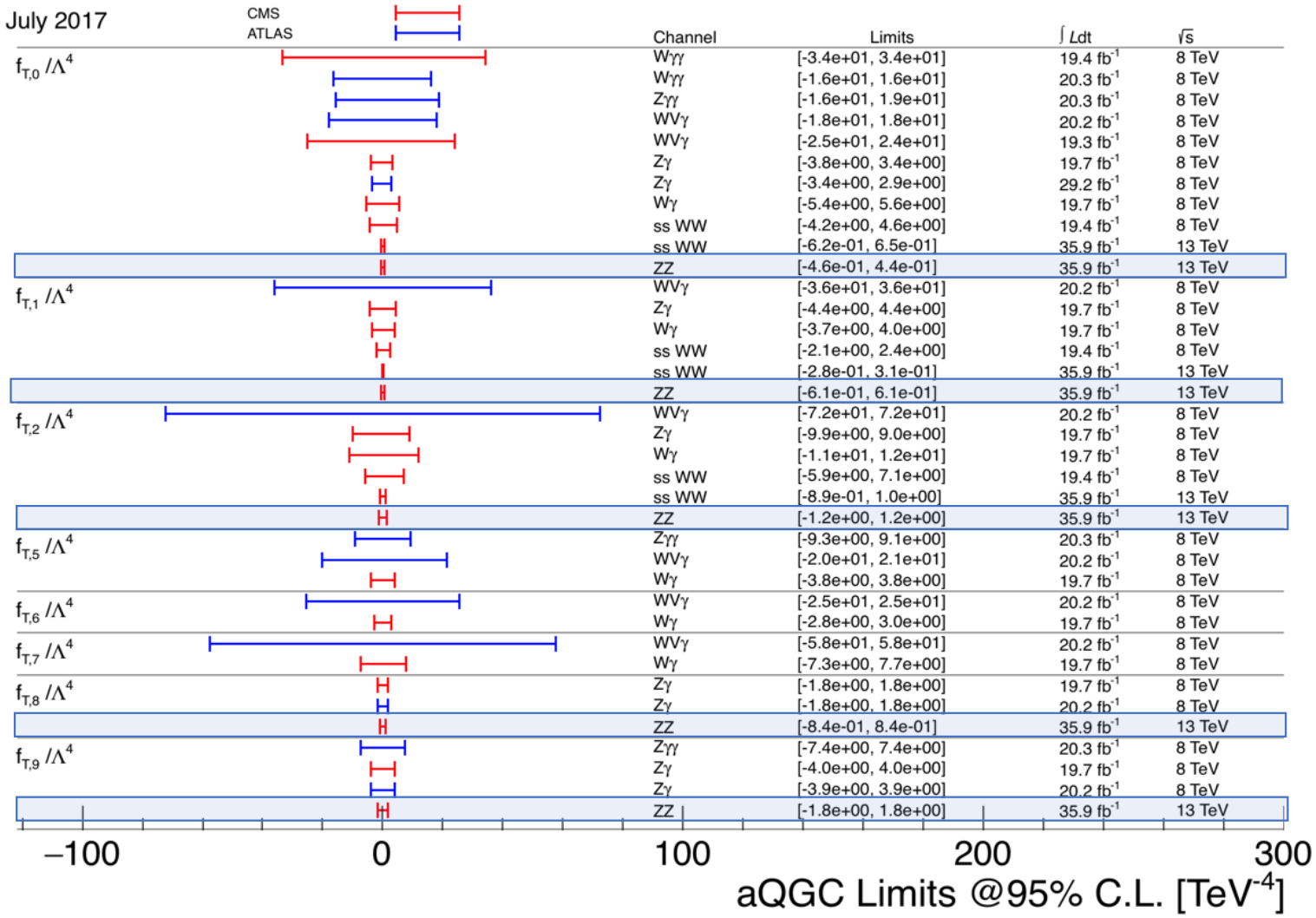


A sötét anyag: korlátok



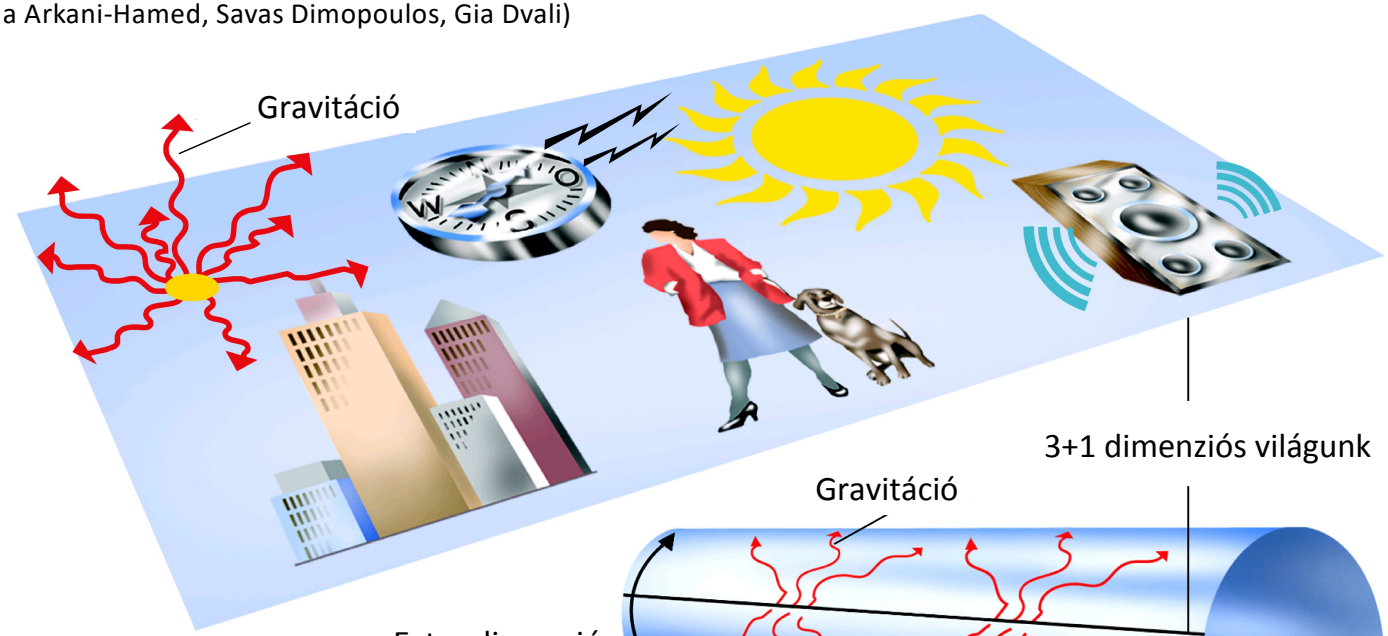


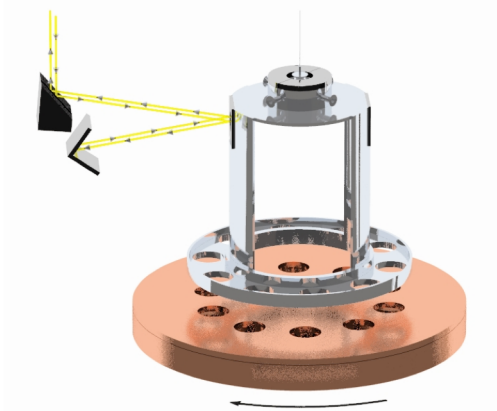
Vektorbozon szórás és anomális csatolások



A nagy ED ADD modellje

(Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos, Gia Dvali)





Gravitáció gyenge 3+1 dimenzióban a rejtett térfogat miatt:

$M_{Planck}^2 = V_n M_{Planck[4+n]}^{2+n}$

Gravitációs potenciál módosul r<<R esetén:

$V(r) = m_1 m_2 / M_{Planck[4+n]}^{2+n} r^{1+n}$

Eöt-Wash kísérlet (Uni Washingtom, Seattle), ~0.2 mm

Randall-Sundrum ED modell

