

# BEVEZETÉS A RÉSZECSEKEFIZIKÁBA 3.

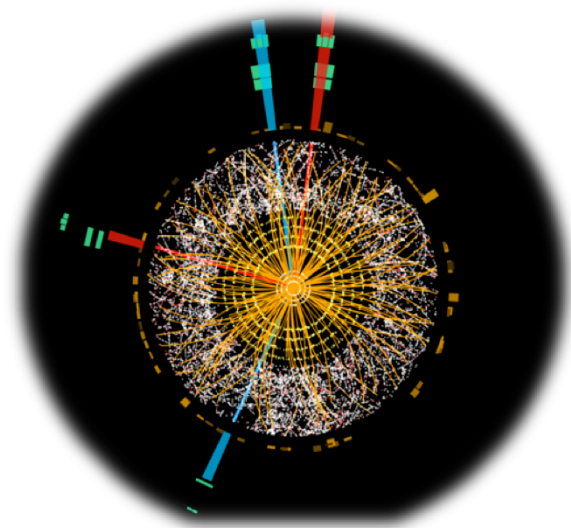
Pásztor Gabriella

University of Geneva & MTA Wigner FK

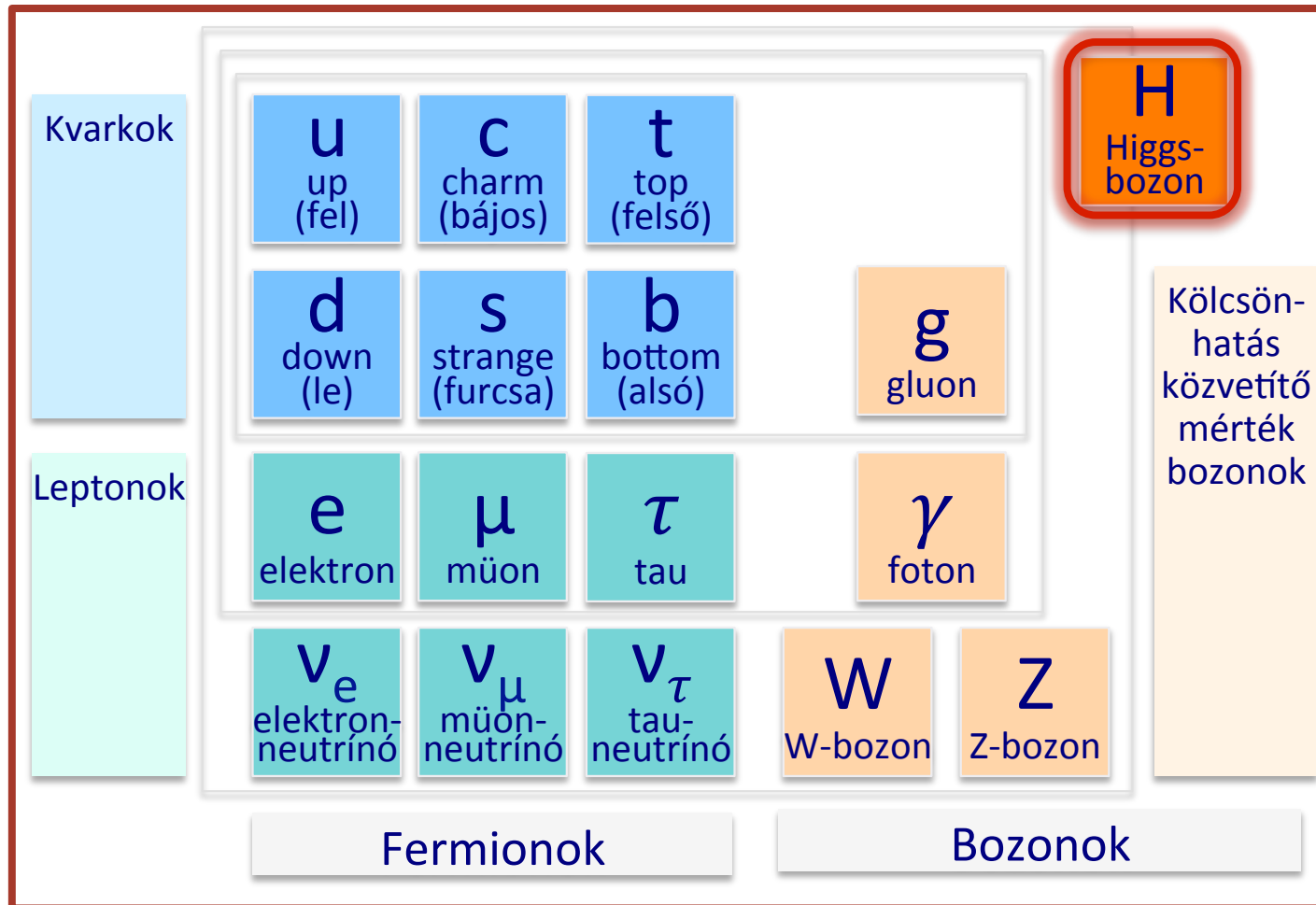
[Gabriella.Pasztor@cern.ch](mailto:Gabriella.Pasztor@cern.ch)

CERN Hungarian Teachers Programme

2013. augusztus 12-15.



# A STANDARD MODELL ✓



Jóslatai sorra bebizonyosodtak, immár teljes.  
Nagyszerűen egyezik a kísérleti adatokkal...

# NYITOTT KÉRDÉSEK A STANDARD MODELLBEN ... AMIKRŐL MÁR BESZÉLTÜNK

- Neutrínók tömege
- Anyag – antianyag aszimmetria, CP sértés forrása, mértéke
- Miért van három fermion család?
- Fermion tömegek széles skálája
- Gravitációs kölcsönhatás gyengesége a többi alapvető kölcsönhatáshoz képest
- Gravitáció kvantumelmélete (graviton?)
- Sötét anyag, sötét energia (kozmológiai megfigyelések!)
- ... és még néhány más, amiről eddig nem esett szó

A SM nem lehet az utolsó szó a részecskefizikában

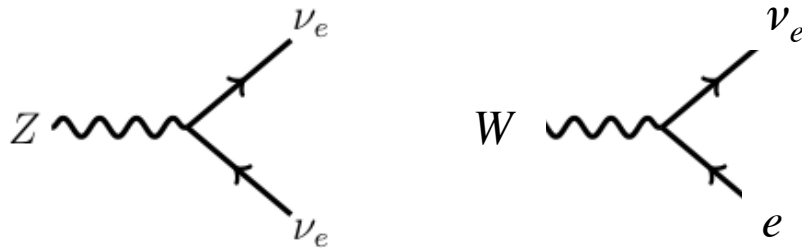
Milyen még alapvetőbb elmélet állhat a SM mögött?

# 3. RÉSZ

## Neutrínók

*Neutrínó emlékeztető:*

- Elektromosan semleges lepton
- Csak a gyenge kölcsönhatásban vesz részt



- Könnyű
- 3 fajtát ismerünk: elektron-, muon- és tau-neutrínók

# KIRALITÁS

- Kiralitás vagy kezesség, arra jellemző, hogyan viselkedik egy részecske tértükrözésre
  - A részecskék egy belső tulajdonsága
  - 0-tömegű részecskékre, kiralitás = helicitás
- Jobb-kezes,  $h=1$                       Bal-kezes,  $h=-1$

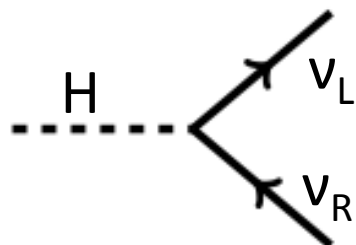
$$h = \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{p}}$$



- Elemi részecskék, lehetnek jobb- vagy bal-kezesek (pl.  $e_L$ ,  $e_R$ )
- A megfigyelhető “fizikai” részecskék, a jobb- és bal-kezes állapotok keveréke (pl.  $e$ )

# NEUTRÍNÓK A STANDARD MODELLBEN

- Gyenge kölcsönhatás paritás sértő
- Ennek leírására a SM-be csak balkezes neutrínókat vezettek be
- A fermionok tömegüket a Higgs bozonnal való kölcsönhatásból kapják

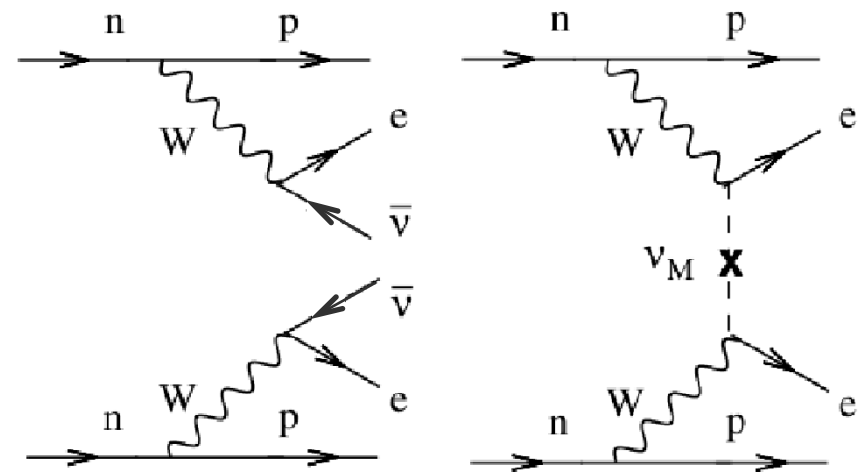


- A neutrínók tömegét tehát pontosan 0-nak feltételezték
- Régóta sejtették és 2001-ben kísérletileg bizonyították: a neutrínók tömege kicsi, de nem nulla
- A SM-t módosítani kell
- Beköszöntött a “neutrínó korszak”

Fermion	Erős	EM	Gyenge
Balkezes kvark	✓	✓	✓
Jobbkezes kvark	✓	✓	
Balkezes töltött lepton		✓	✓
Jobbkezes töltött lepton		✓	
Balkezes neutrínó			✓
Jobbkezes neutrínó?			

# A NEUTRÍNÓK TERMÉSZETE: DIRAC VAGY MAJORANA?

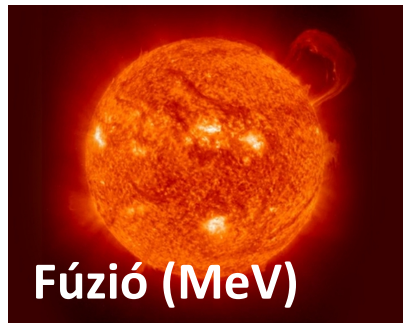
- Egy töltött részecske és anti-részecske társa mindig különböző, hiszen töltésük különböző, pl. elektron és pozitron
- A semleges részecskéknél mindkét eset előfordulhat:
  - $\gamma$ ,  $Z$ ,  $\pi^0$  és anti-részecske társuk megegyeznek
  - $K^0$ ,  $n$  különböznek anti-részecske társuktól
- Nem ismerünk még olyan fermion, amely megegyezik az anti-részecskéjével (majorana fermion)
- Mi a helyzet a neutrínókkal?
  - Ha  $\nu = \text{anti-}\nu$ , majorana részecske
  - Ha  $\nu \neq \text{anti-}\nu$ , dirac részecske
- Kísérletileg eldönthető:  
ha  $\nu$  majorana, neutrínó nélküli dupla  $\beta$ -bomlás lehetséges (ugyanazt a részecskét kibocsájthatja és elnyelheti a neutron)
- A válasz utat mutatna a SM kibővítésének módjára



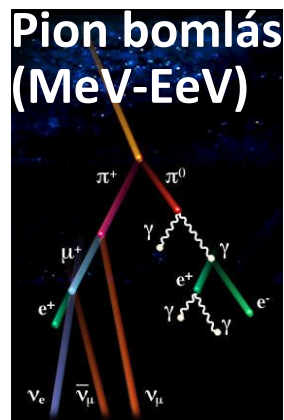
Gerda kísérlet  
(Gran Sasso, I),  
2013, július:  
 $76\text{Ge } t_{1/2} > 2.1 \cdot 10^{25} \text{ év}$

# NEUTRINÓ KELETKEZÉS

A természetben keletkeznek  
a Napban,



a légkörben,



szupernovákban,



élőlényekben, ...



Előállíthatjuk őket  
atomreaktorban,



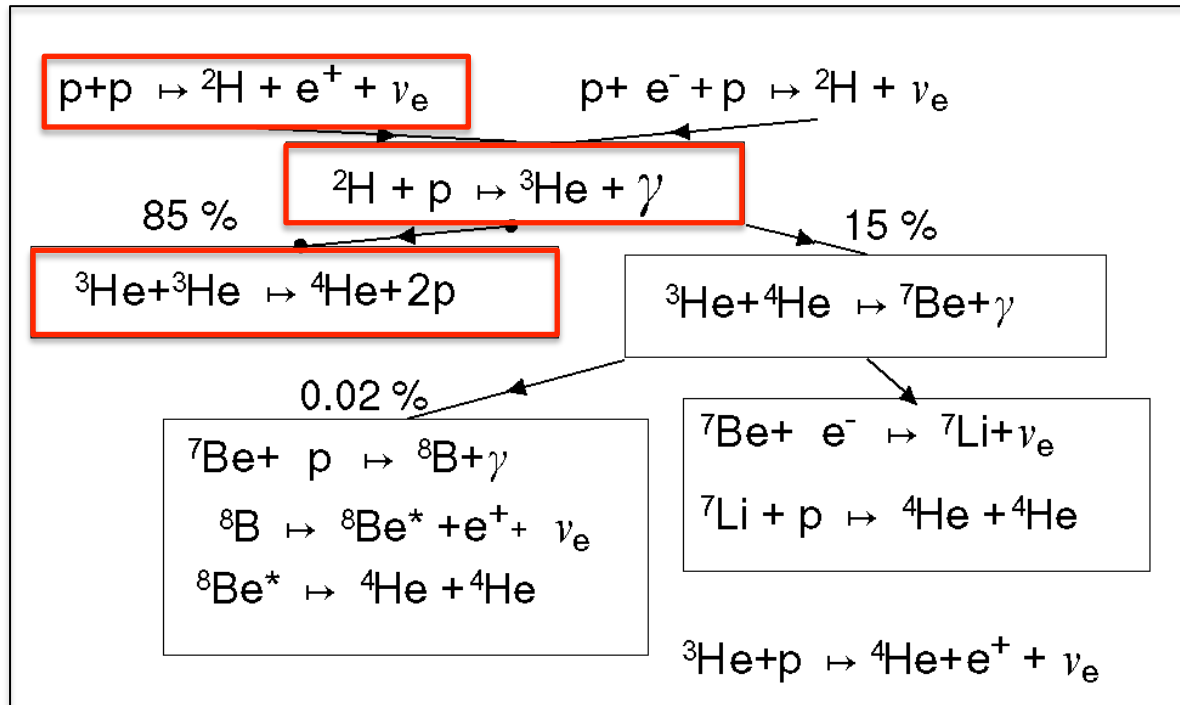
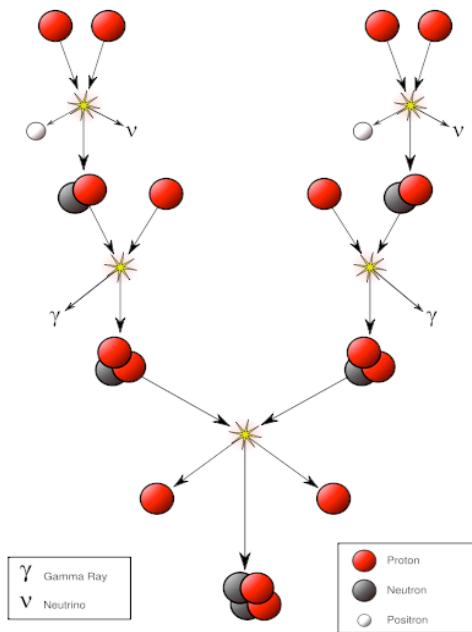
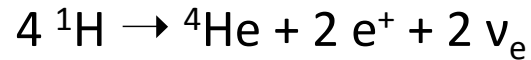
részecskegyorsítókkal





# A NAP NEUTRÍNÓI

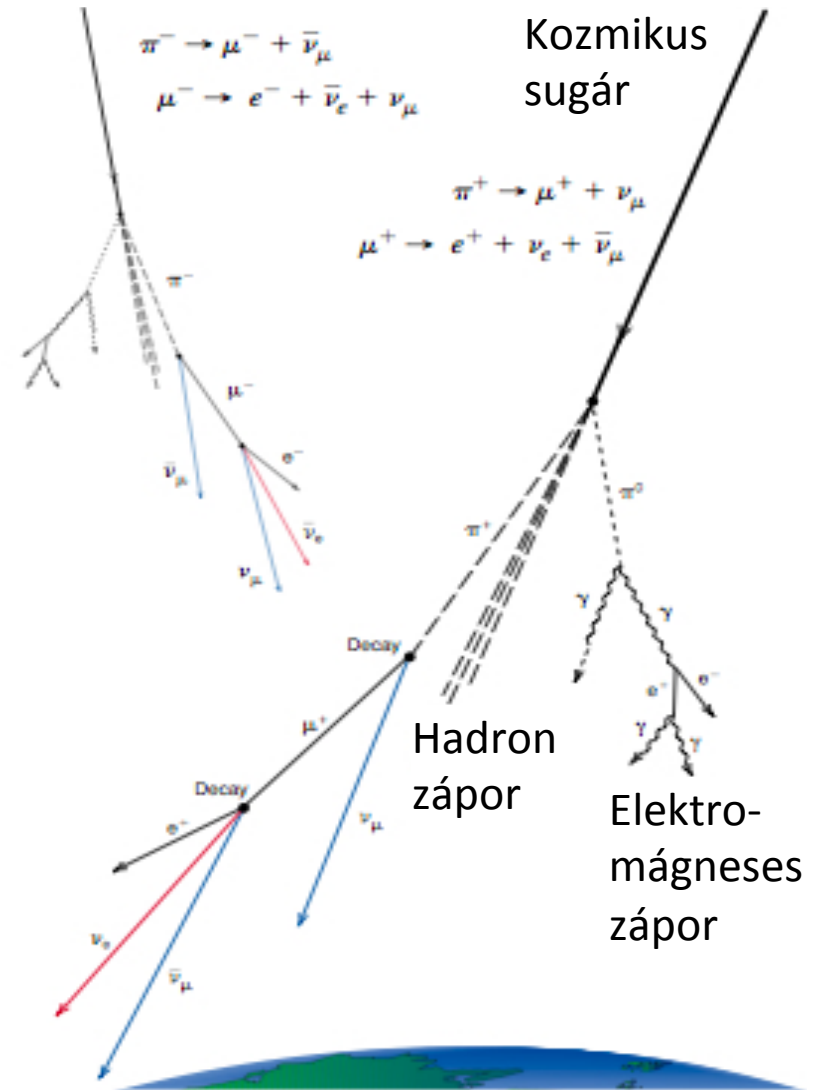
Magfúzió:



- Elektron neutrínók  $10^8$  km távolságról
- Nagy tömegű detektorokkal vizsgálják (10-10 000 t)
- Első eredmény 1968-ban a Homestake detektorral ( $\nu_e + \text{}^{37}\text{Cl} \rightarrow \text{e}^- + \text{}^{37}\text{Ar}$ , a radióktív Ar méréséből)
- Észlelt eseményszám  $\approx$  Napmodellből számolt érték 1/3-a
- Homestake 1998:  $2.56 \pm 0.16 \pm 0.16$  SNU [Solar Neutrino Unit =  $10^{-36}$  esemény / (atom s)]
- Elmélet: 6.36 – 9.3 SNU

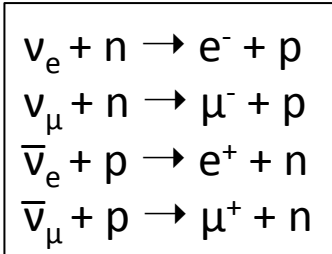
# LÉGKÖRI NEUTRÍNÓK

- Kozmikus sugarak (szupernovák, ősrobbanás,...) ütköznek a légkör részecskéivel
- Másodlagos részecskék bomlásai:  
 $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu \rightarrow (e^\pm \nu_e \nu_\mu) \nu_\mu$
- 30 km-ről  $\nu_e$  és  $2\nu_\mu$ , anti-neutrínók is
- Mért  $N(\nu_\mu)/N(\nu_e) \ll 2$



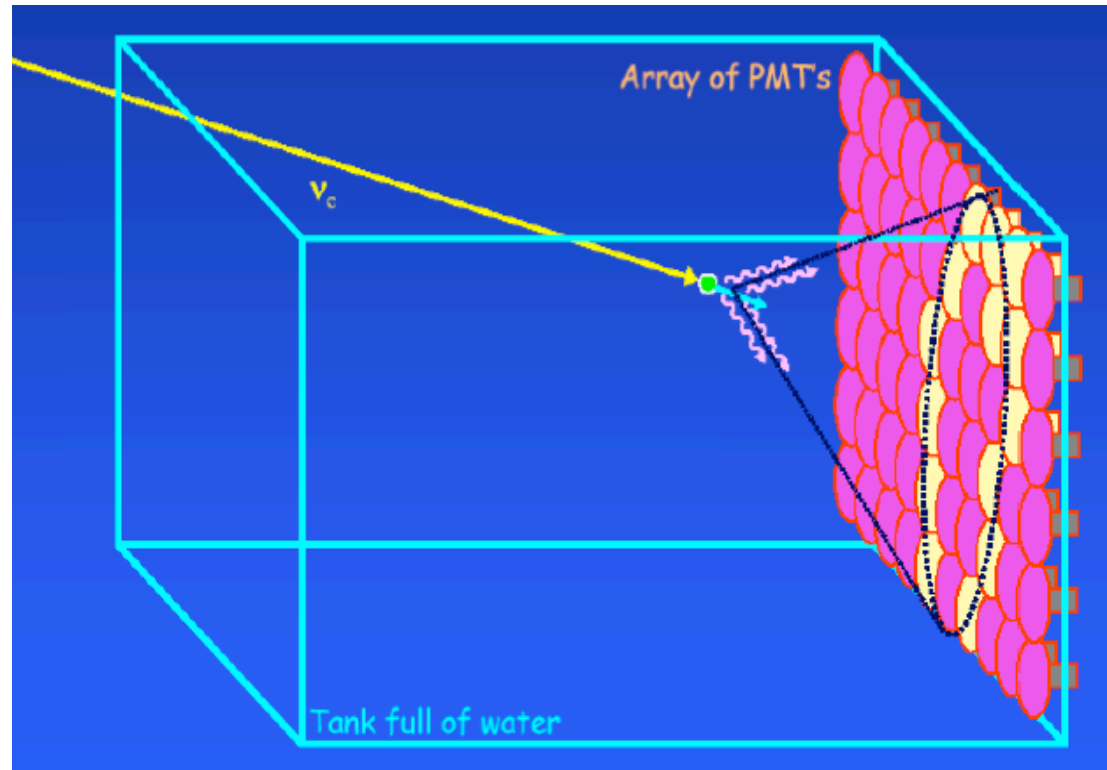
# NEUTRÍNÓ KÍSÉRLETEK BÁNYÁBAN, TENGERFENÉKEN, JÉGBEN REAKTOR KÖZELÉBEN VAGY GYORSÍTÓVAL MEGCÉLOZVA



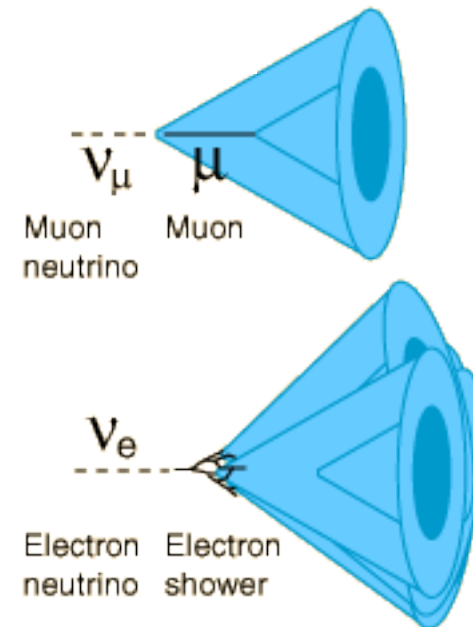


# NEUTRÍNÓ ÉSZLELÉS VÍZBEN

Gyengén kölcsönható → Anyagon általában zavartalanul áthalad  
 → Óriási tömegű detektorokra van szükség, hogy észlelhessük



Elektron-neutrínók  
 és muon-neutrínók  
 megkülönböztetése

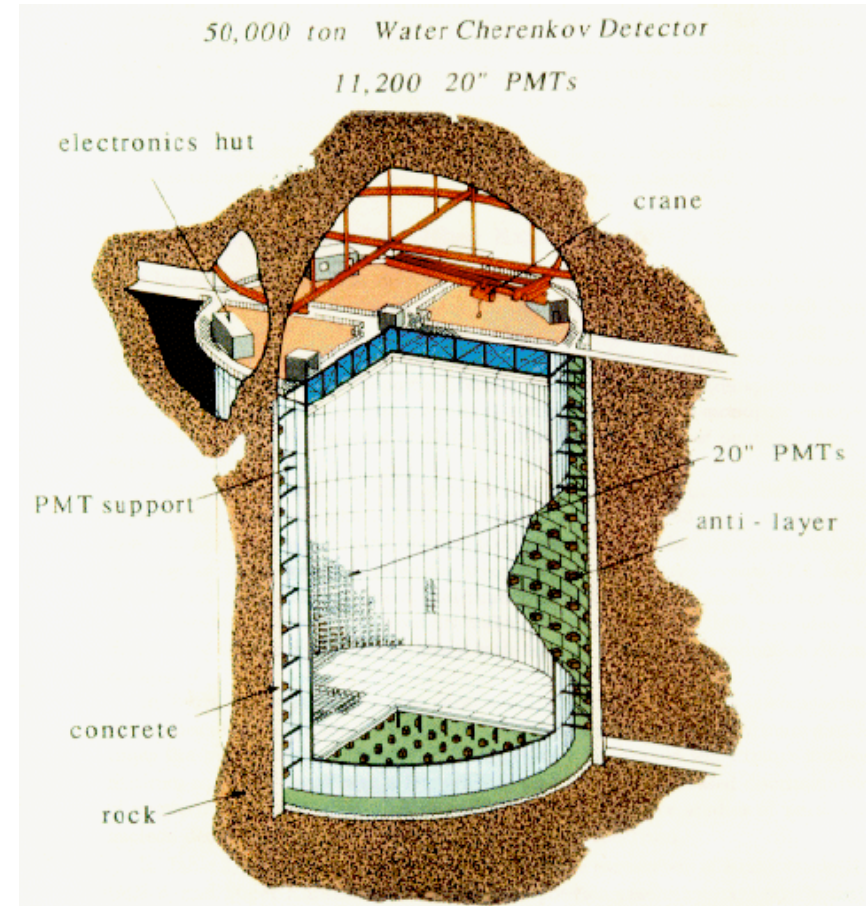


Keletkező töltött részecske sebessége nagyobb  
 mint a fénysebesség vízben → Cherenkov sugárzás

Ellipszis alakja, a PM csövek jelének időzítése, lehetővé teszi az irány meghatározását

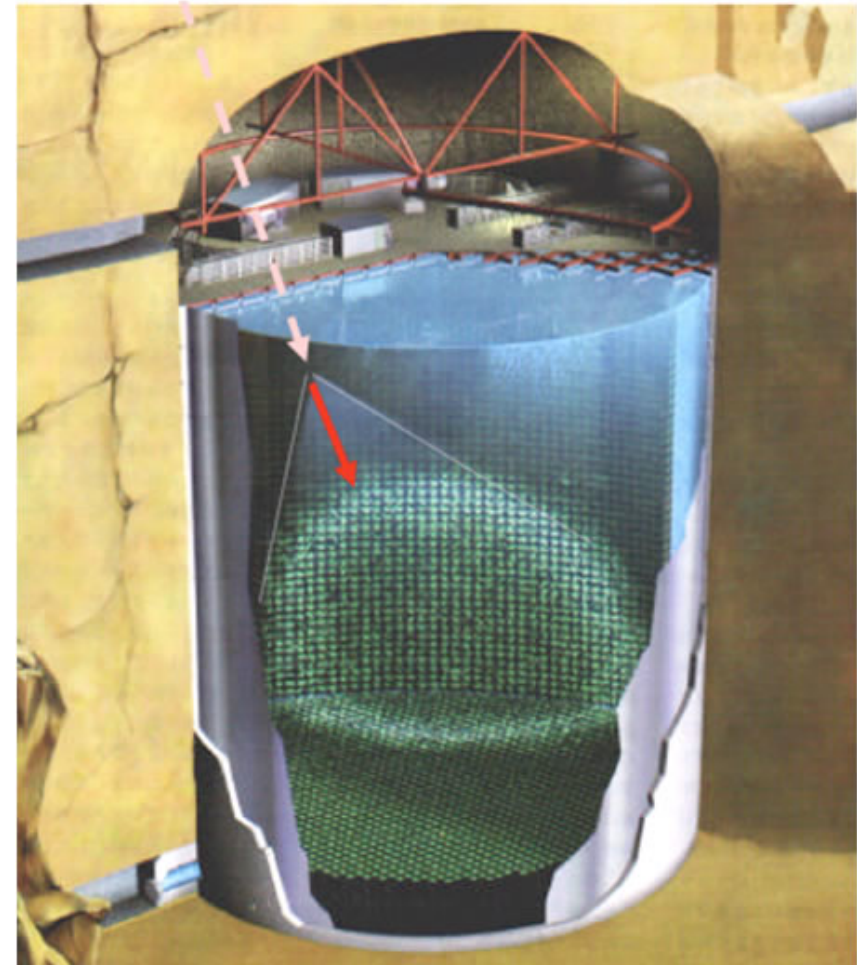
# SUPER-KAMIOKANDE (SKK)

- Kamioka Nucleon Decay Experiment
- 1000 m mélyen a Kamioka bányában Japánban
- Belső detektor:
  - $\varnothing$  39 m  $\times$  42 m tartály
  - 50 000 t tiszta H<sub>2</sub>O
  - 11 146 PMT ( $\varnothing$  51 cm)
- Külső detektor
  - Vétó átfutó e,  $\mu$ , n,  $\gamma$
  - 2 m vastag H<sub>2</sub>O
  - 1 885 PMT ( $\varnothing$  20 cm)
- Neutrínók a Napból, a légkörből és gyorsítókból
- Méri irányuk, energiájuk, fajtájuk

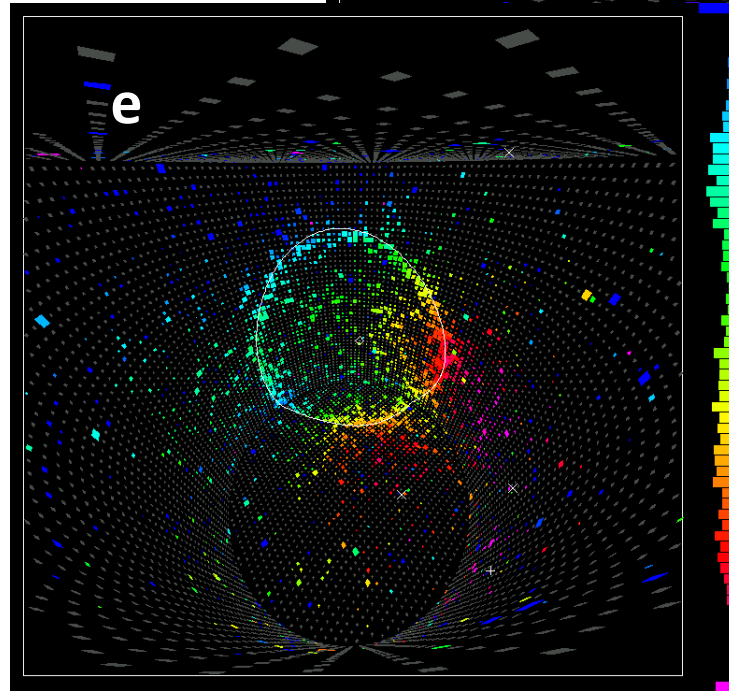
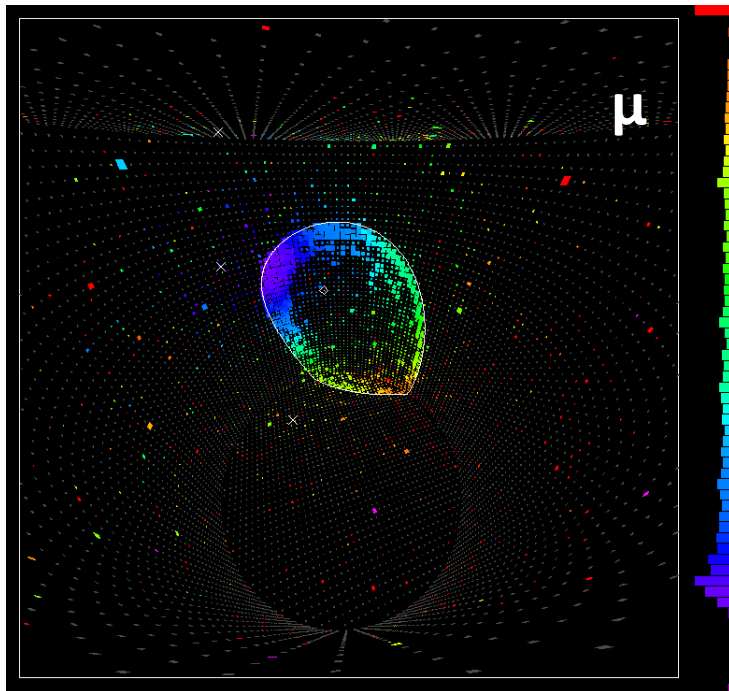
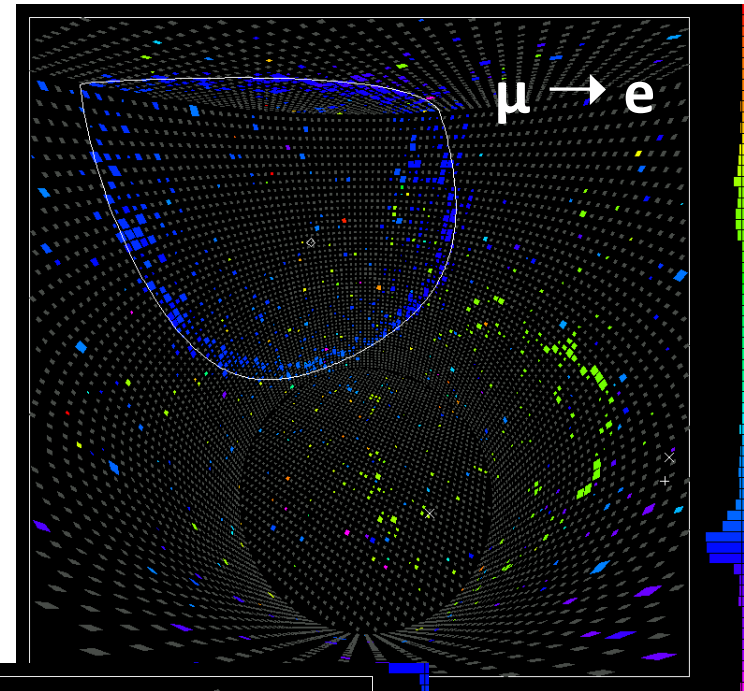


# SUPER-KAMIOKANDE (SKK)

- Kamioka Nucleon Decay Experiment
- 1000 m mélyen a Kamioka bányában
- Belső detektor:
  - $\varnothing$  39 m  $\times$  42 m tartály
  - 50 000 t tiszta H<sub>2</sub>O
  - 11 146 PMT ( $\varnothing$  51 cm)
- Külső detektor
  - Vétó átfutó e,  $\mu$ , n,  $\gamma$
  - 2 m vastag H<sub>2</sub>O
  - 1 885 PMT ( $\varnothing$  20 cm)
- Neutrínók a Napból, a légkörből és gyorsítóból
- Méri irányuk, energiájuk, fajtájuk



# SUPER-KAMIOKANDE



# SUPER-KAMIOKANDE I: EREDMÉNYEK

## NAPNEUTRÍNÓK

- Megerősíti a napneutrínó hiányt (1998)
- SKK-I eredmény:  
adat(1996-2001) / SSM =  
 $0.406 \pm 0.004$  (stat) + 0.014 - 0.013 (sziszt)
- SSM: Solar Standard Model

## LÉGKÖRI NEUTRÍNÓK ( $E < 1$ GeV)

- $[N(\nu_\mu)/N(\nu_e)]_{\text{adat}} / [N(\nu_\mu)/N(\nu_e)]_{\text{MC}} =$   
 $0.658 \pm 0.016$  (stat)  $\pm 0.035$  (sziszt)
- Kevesebb  $\nu_\mu$  mint vártuk (“ $\nu_\mu$  eltűnés”)

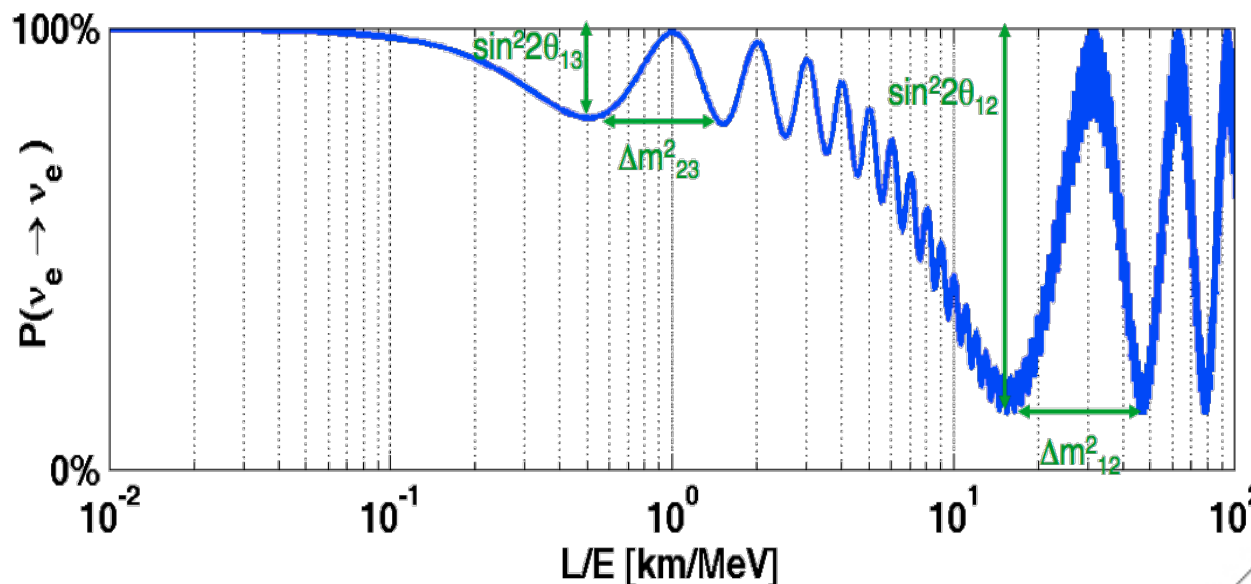
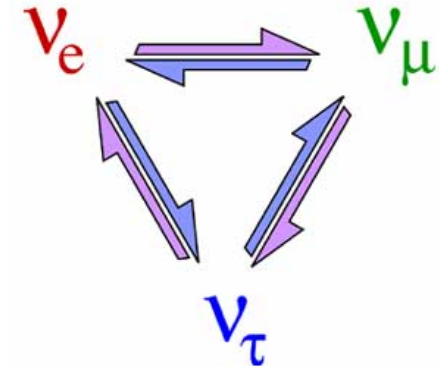
**A Nap, ahogy a neutrínók látják**  
**A napneutrínók rekonstruált forrása**



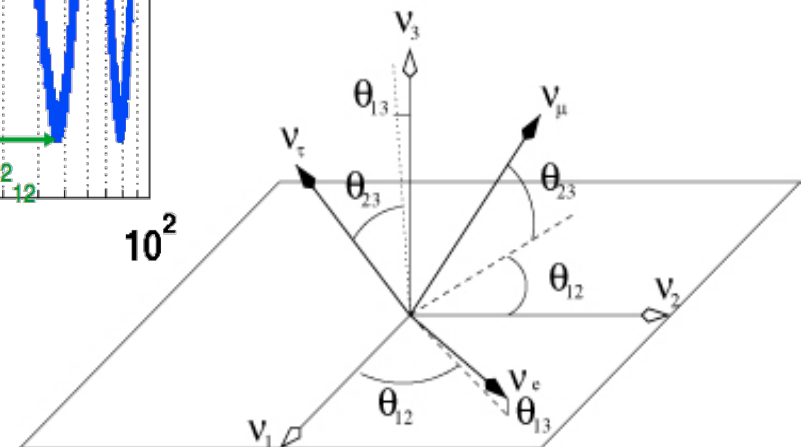


# NEUTRÍNÓ KEVEREDÉS (OSZCILLÁCIÓ)

- Az elméleti jóslatoktól való eltérés a nap és légköri neutrínók észlelt számában megmagyarázható, ha feltesszük, hogy a neutrínó fajták átalakulhatnak egymásba
- A valószínűség, hogy egy neutrínó megtartja a fajtáját függ a megtett távolságnak és a neutrínó energiájának hányadosától



Keveredési szögek:  
összefüggés a neutrínó fajták és a meghatározott tömegű neutrínó állapotok között



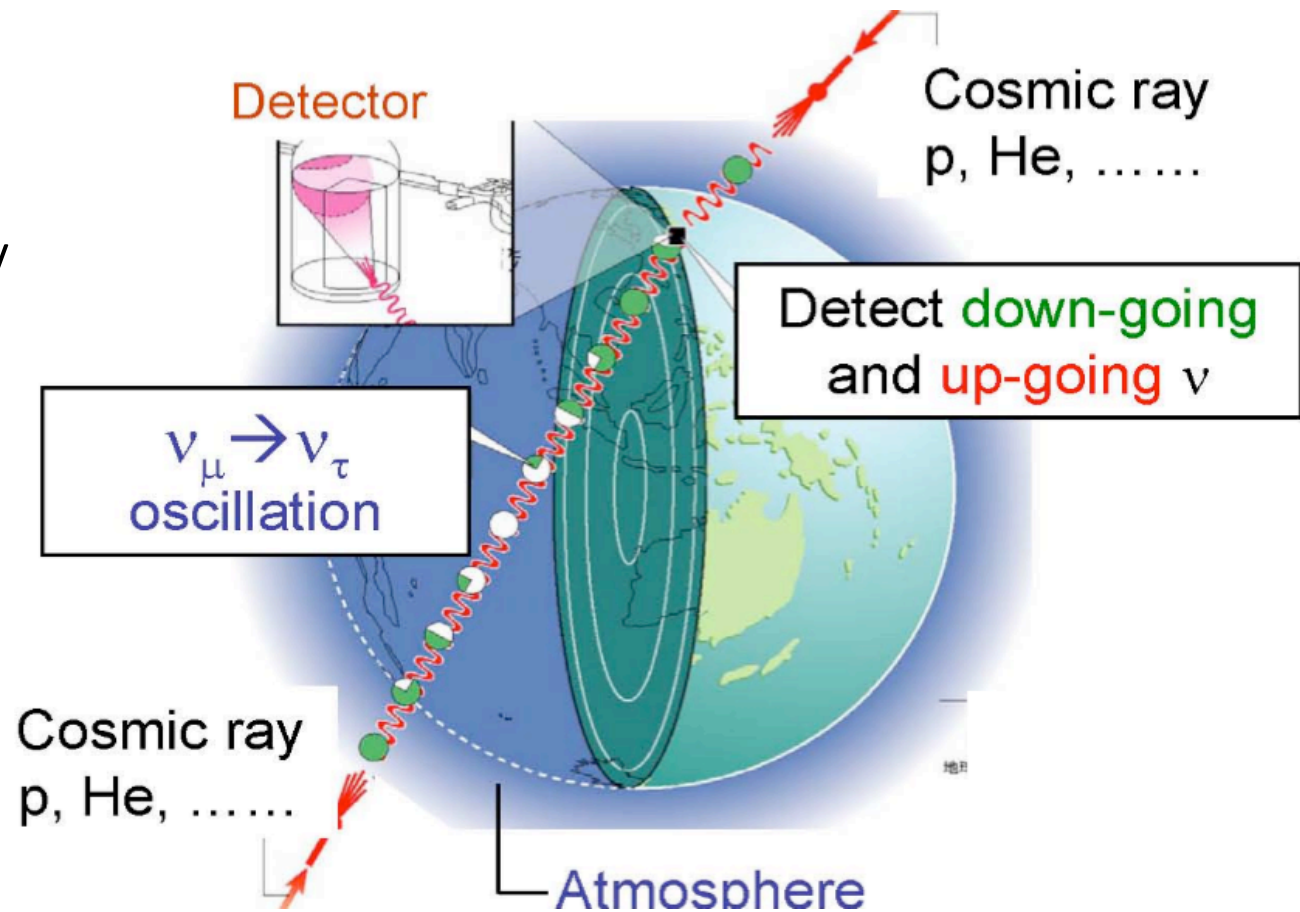
→ Mérhetők a tömegkülönbségek és a keveredési szögek

# NEUTRÍNÓ OSZCILLÁCIÓ MÉRÉSE: SKK-I

$\nu_\mu$  eltűnés mérése a Föld átmérőjén keresztül

$$\text{Fluxus}^\uparrow / \text{Fluxus}^\downarrow = \frac{N(-1 < \cos\theta < -0.2)}{N(0.2 < \cos\theta < 1)} = 0.54 \pm 0.04$$

$$\Delta m_{\text{atm}}^2 = (1.3-3.0) \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$



# NEUTRÍNÓ OSZILLÁCIÓ MÉRÉSE: SKK-I

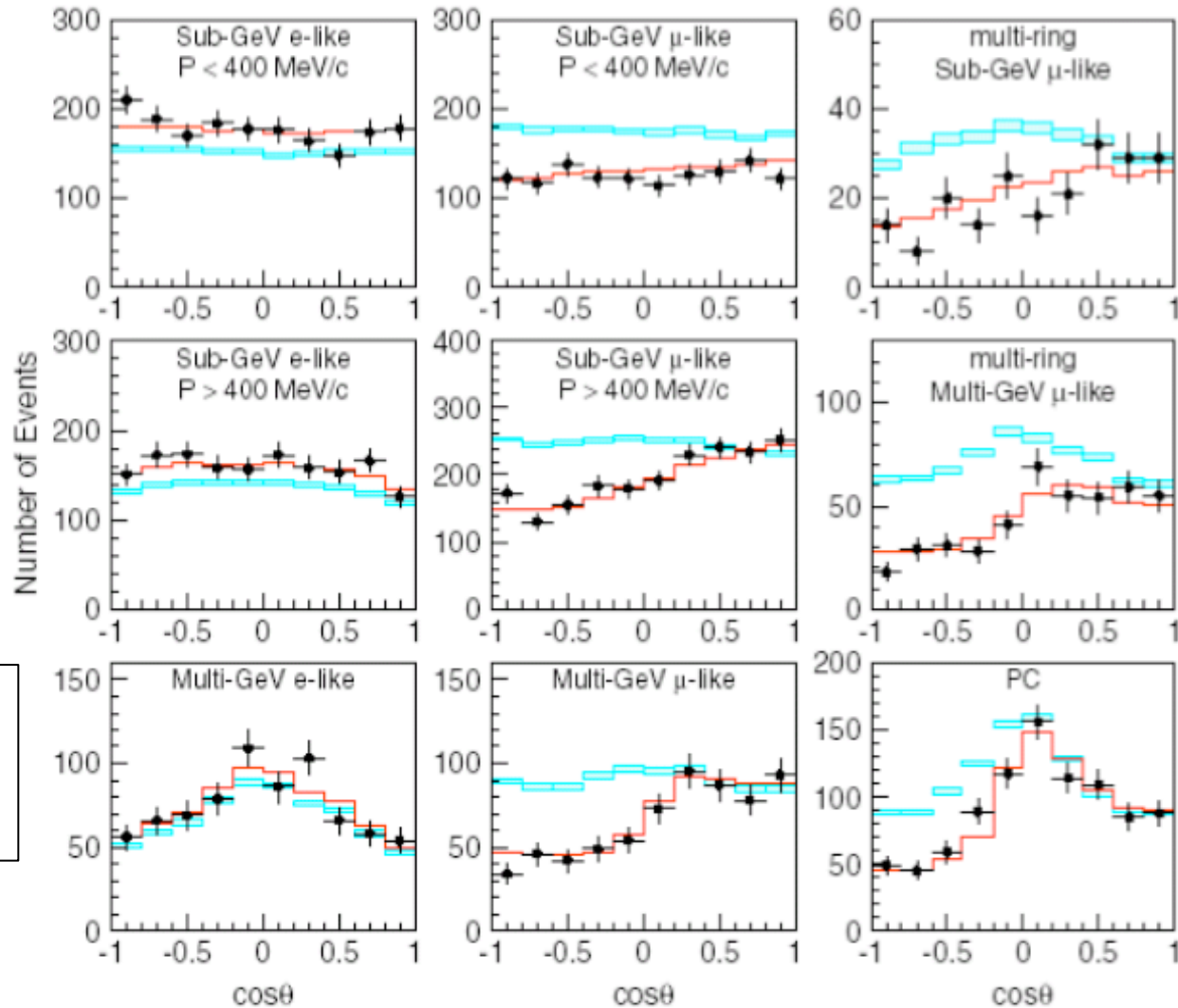
- Fentről érkező  $\nu_e, \nu_\mu$  megvan
- Lentről érkező  $\nu_\mu$  elfogy
- Oszcilláció a föld átmérőjében
- M. Koshiba, Nobel díj 2002

SKK adat

MC oszcilláció nélkül

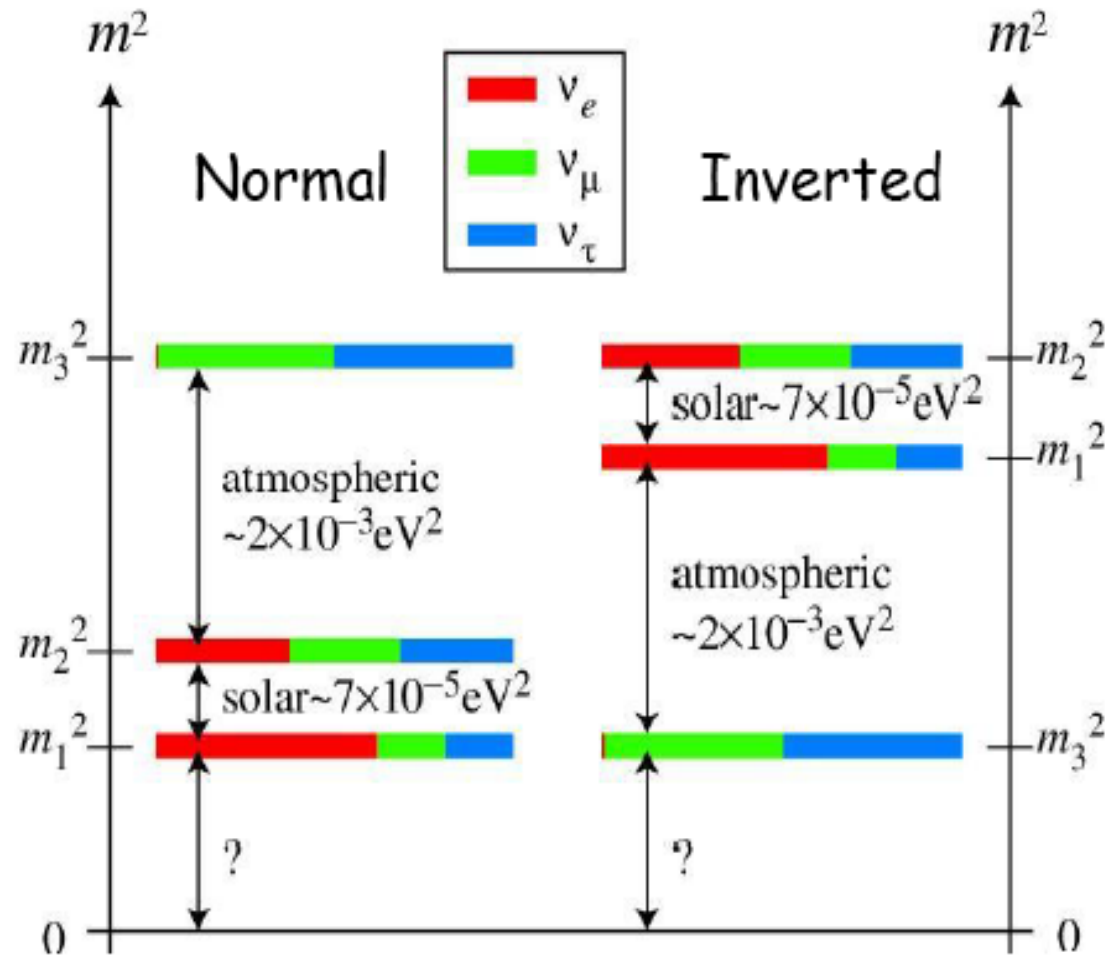
MC  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$  oszcillációval

$\Theta$ : zenitszög



# TÖMEG SAJÁTÁLLAPOTOK

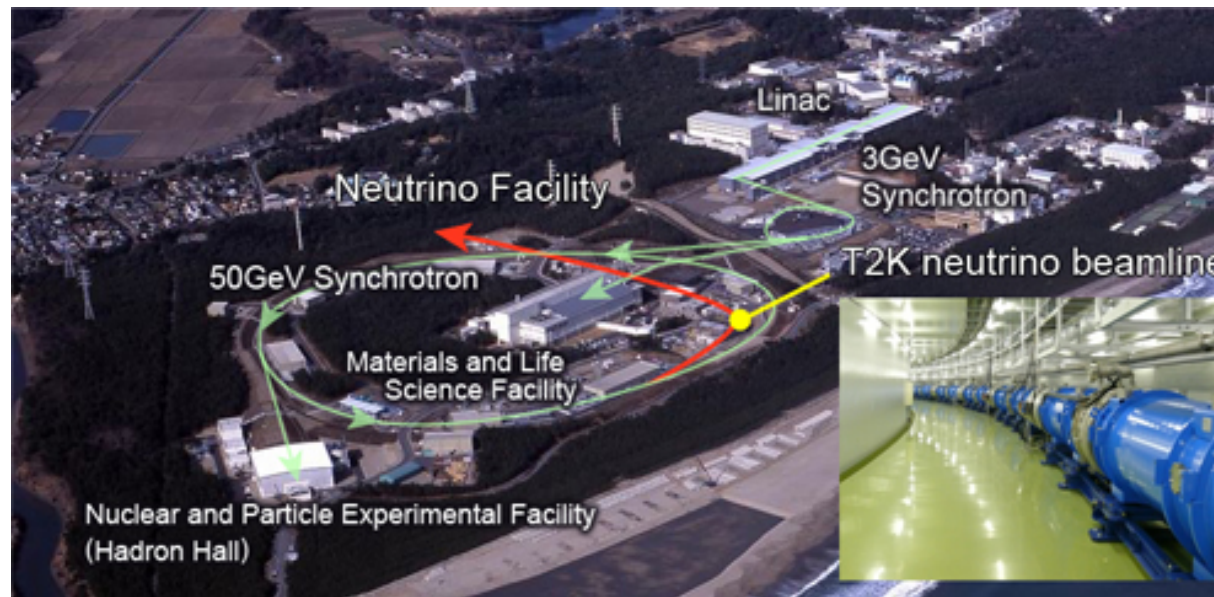
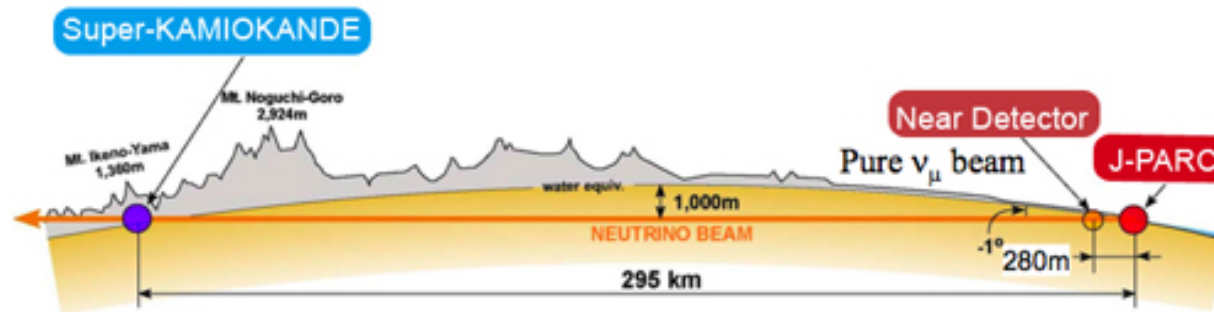
- $m_{\min} < 2.2 \text{ eV}$
- Normal ( $m_1 < m_2 < m_3$ )  
vagy fordított ( $m_3 < m_1 < m_2$ )  
hierarchia?



- Abszolút tömegskála:  $\beta$ -  
bomlás végpontjából

# T2K (TOKAI-TO-KAMIOKA KÍSÉRLET)

- Gyorsító neutrínó kísérlet Japánban
- 295 km távolság (JPARC neutrínó nyaláb – Super Kamiokande detektor)



# ELEKTRON ÉS TAU NEUTRÍNÓ MEGJELENÉS

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$  **oszcilláció** első jelei a T2K kísérletben (2011)

2013 július:  $7.5\sigma$  szignifikanciájú bizonyítás

→ Mérhető a lepton szektor CP-sértő fázisa

• Keveredési szögek:

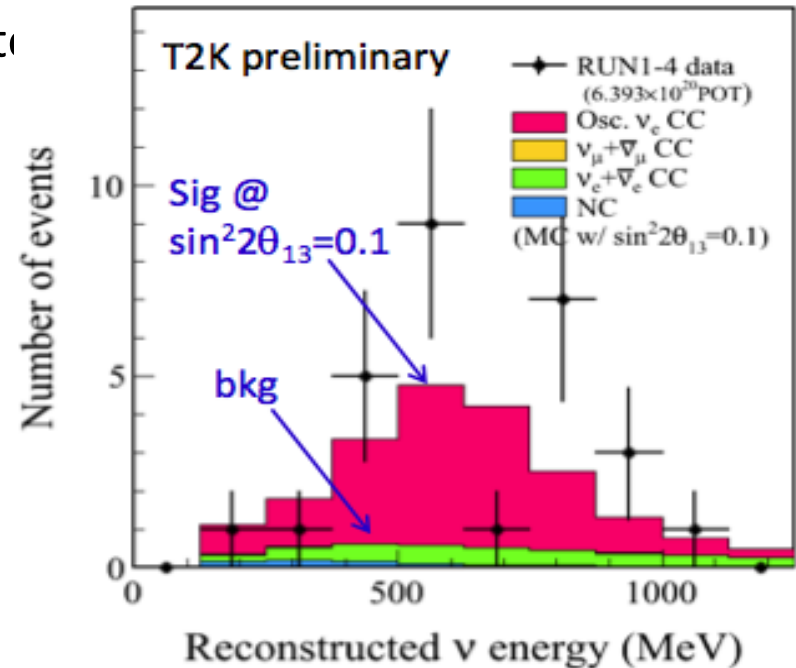
$$\theta_{12} = 34^\circ \pm 1^\circ$$

$$\theta_{23} = 40^\circ + 5^\circ / - 2^\circ$$

$$\theta_{13} = \boxed{9.1^\circ \pm 0.6^\circ!}$$

Daya Bay, RENO, Double Chooz  
reaktor kísérletek

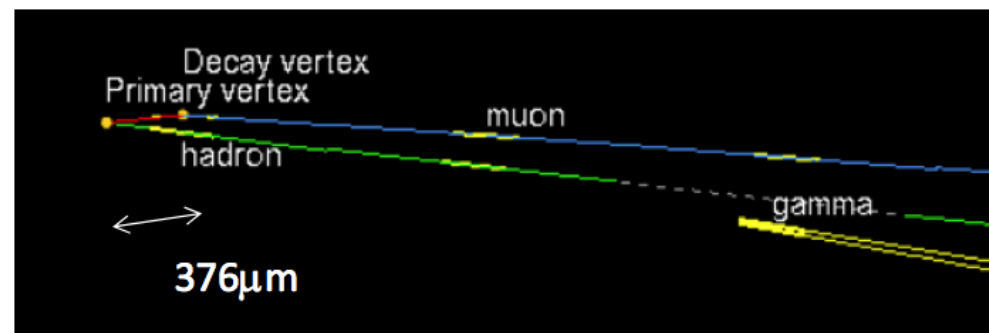
T2K, MINOS gyorsító kísérletek



$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$  **oszcilláció:**

Super-K léghőri adatok ( $3.8\sigma$ )

OPERA gyorsító kísérlet, CERN  
(2013 március: 3. esemény)



# 4. RÉSZ

A Standard Modellen túl:  
szuperszimmetria és extra dimenziók

# MIÉRT VAN HÁROM FERMION CSALÁD? MIÉRT OLYAN KÜLÖNBÖZŐ A RÉSZECSKÉK TÖMEGE? MIÉRT KICSI DE NEM NULLA A NEUTRÍNÓK TÖMEGE?

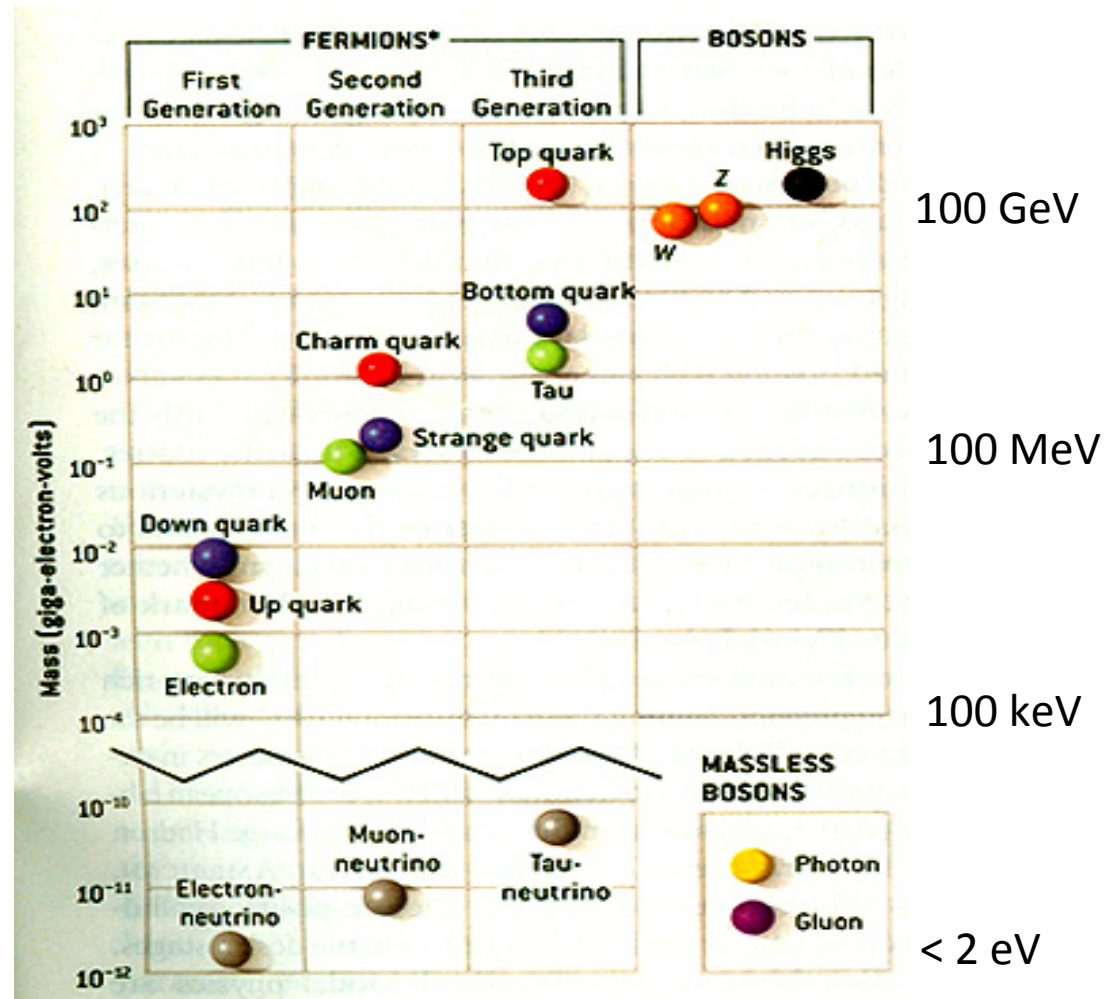
MIÉRT NEM TRIVIÁLIS  
A TÖLTÉSKVANTÁLÁS?

$$Q_e = -Q_p$$

$$Q_d = Q_e/3$$

$$Q_u = -2Q_e/3$$

MIÉRT ALAKULT KI AZ  
ANYAG – ANTI-  
ANYAG  
ASZIMMETRIA?





# SÖTÉT ANYAG

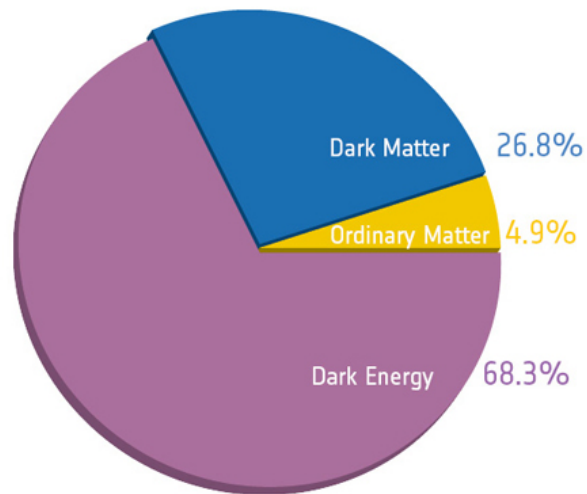
- Kozmológiai megfigyelések arra mutatnak, hogy csupán az univerzum kis hányadát alkotja a látható anyag
- A sötét anyag léteire annak gravitációs hatásából következtetünk
- **Mi a sötét anyag?**
  - Forró (relativisztikus) sötét anyag: neutrínók
  - Nem fényes normál anyag: fekete lyukak, neutron csillagok, barna törpék, bolygók, ...(MAssive Compact Halo Objects)
  - Gyengén kölcsönható nehéz részecskék?
  - Axionok?
  - Steril neutrínók?
- **Hogyan tudjuk megfigyelni a természetben?  
Hogyan tudjuk előállítani laboratóriumban?**



Túl mutatnak a Standard Modellen

# SÖTÉT ENERGIA

Kozmológiai  $\Lambda$ CDM Modell



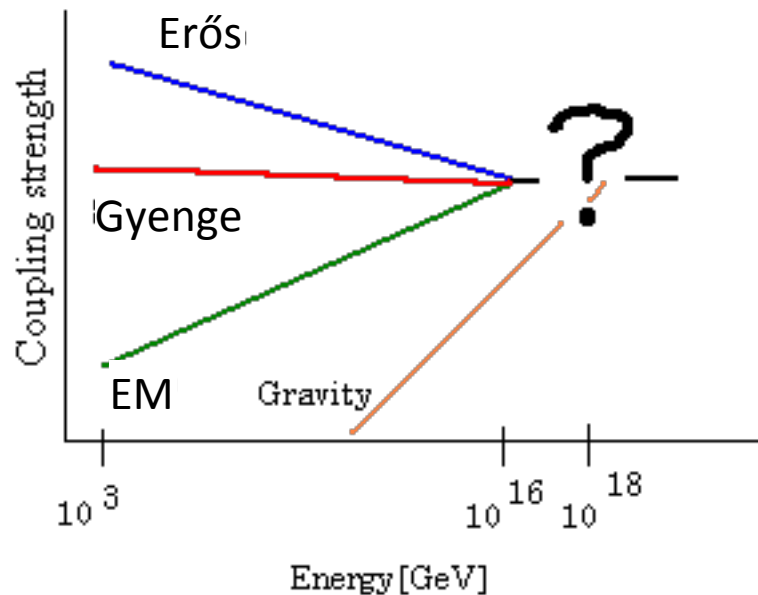
- Az univerzum tágulása gyorsul
- Ez egy ismeretlen sötét energia (a gravitációval ellentétes hatású taszító erő, negatív nyomás) létezésére utal
- **Mi a sötét energia?**
  - Einstein-féle kozmológiai konstans
  - Kvintesszencia (időben változó skalár tér, egy új 5. kölcsönhatás)
  - ... és még sok más javaslat

*Alternativa: Módosított gravitációs törvény?*

*Vagy csupán jobb közelítések szükségesek az Einstein-egyenletek megoldásához?*

# A KÖLCSÖNHATÁSOK EGYESÍTETT ELMÉLETE

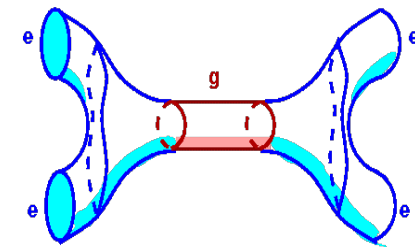
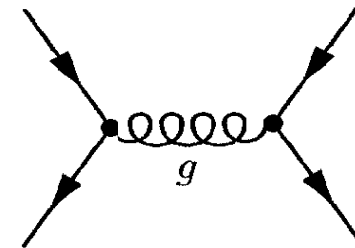
*Élete utolsó éveiben Einstein azon dolgozott, hogy egyesítse a gravitáció és elektromosság elméletét... célja még ma sem vált valóra*



- Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás magas energiákon közös elméletbe foglalható → elektro-gyenge elmélet
- Igéretes ötletek vannak az elektro-gyenge és erős kölcsönhatások nagy egyesítésére is
- **Megvalósul a nagy egyesítés?**
- A gravitáció kvantumelmélete azonban koncepcionális változtatást igényel (→ húrelmélet?)
- **Hogyan alkotható meg a Theory-Of-Everything?**

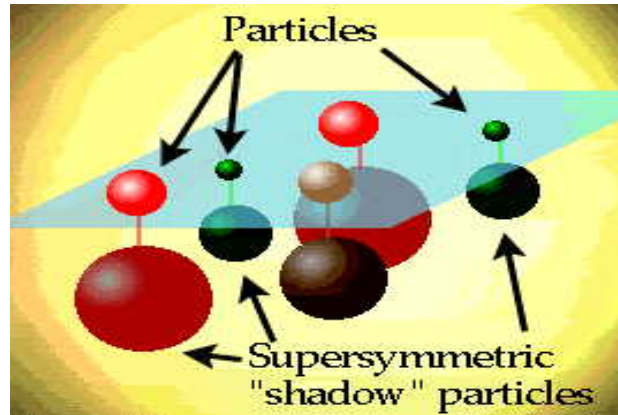
# HÚRELMÉLET

- 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-idéjében pontszerűen (0-távolságon) mennek végbe
- Az általános relativitás elmélet szerint a tér-időt a benne lévő anyag alakítja
- A KM-t a gravitonra, a gravitáció feltételezett közvetítő részecskéjére alkalmazva a matematika nem működik: a graviton viselkedése 0-távolságon nem értelmezhető
- Húrelméletben a részecskék nem pontszerűek, hanem kis elemi hurok rezgései
- A kölcsönhatások a részecskék között nem 0-távolságon, hanem a hurok méretének skáláján mennek végbe, ezzel feloldódik az általános relativitáselmélet és a kvantum-mechanika közti ellentmondás
- A részecskék tulajdonságait az elemi hurok rezonancia frekvenciája határozza meg: különböző rezgésekhez különböző elemi részecskék tartoznak

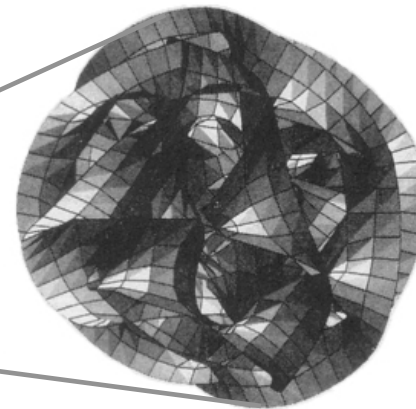
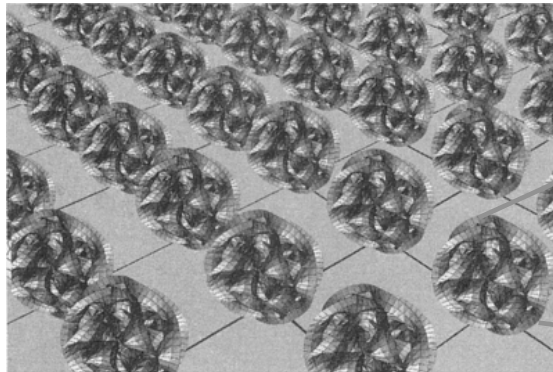


# HÚRELMÉLET

- Természetes energia skála: Planck energia  $\sim 10^{19}$  GeV körül
- Nem vizsgálató közvetlenül az LHC-n (de a jövőbeli gyorsítókkal sem)
- Általános jóslatok:
  - Szuperszimmetria



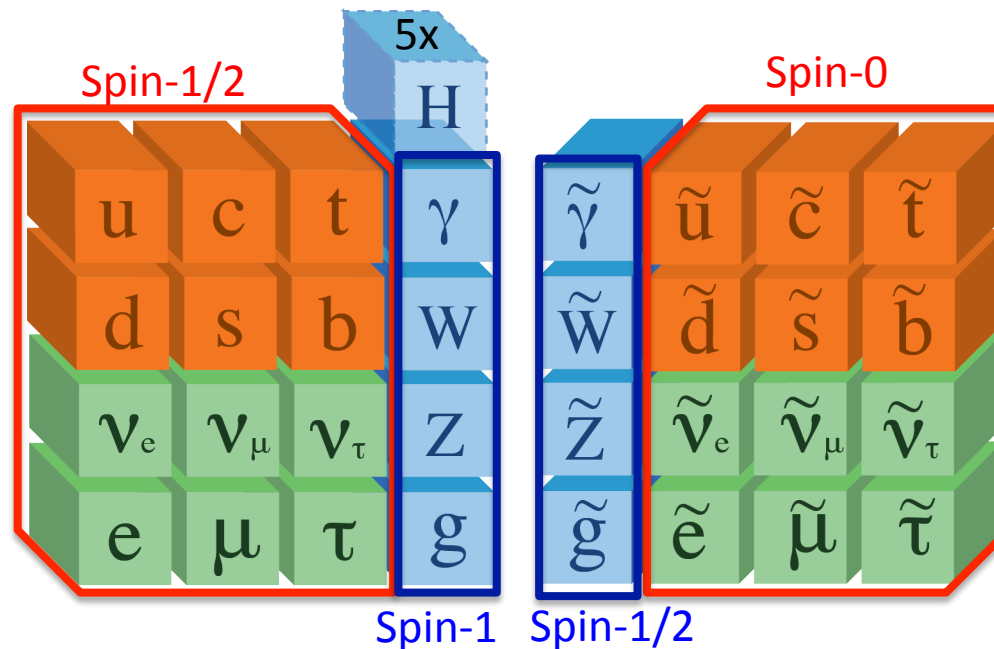
- Extra térbeli dimenziók (11 dimenziós téridő)



További térbeli dimenziók:  
6-dimenziós  
Calabi-Yau tér

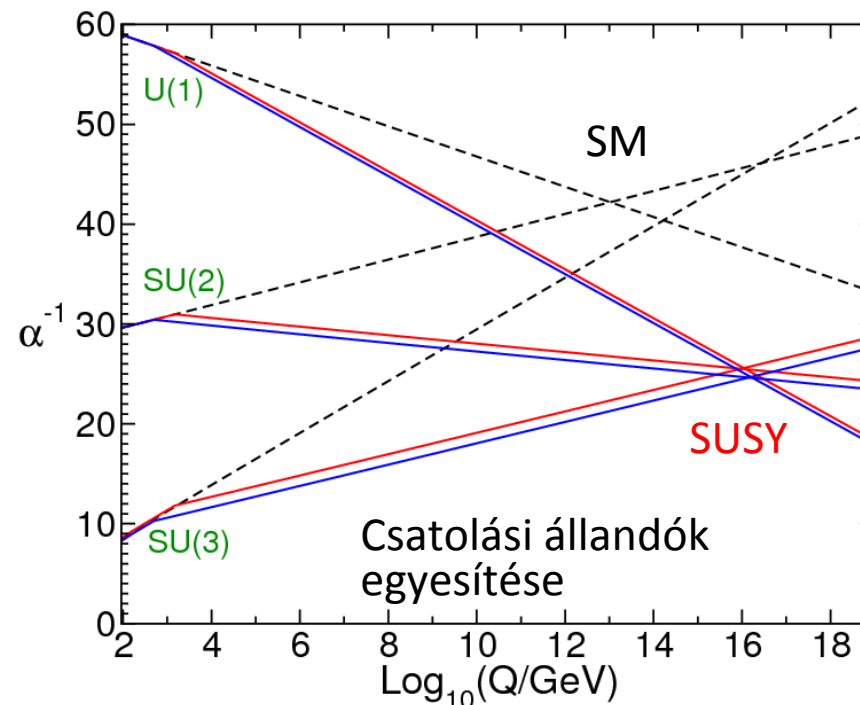
# SZUPERSZIMMETRIA (SUSY)

- Szimmetria az anyagot alkotó (fermionok) és a kölcsönhatásokat közvetítő (bozonok) részecskék között
- A tér-idő alapvető (legáltalánosabb) szimmetriája
- Minden részecskéhez jósol egy új, nehéz társat:  
részecske  $\leftrightarrow$  partner, anti-részecske  $\leftrightarrow$  anti-partner,  $X_L, X_R \leftrightarrow \tilde{X}_1, X_2$



# MIBEN SEGÍT A SZUPERSZIMMETRIA?

- A legkönnyebb szuperszimmetrikus részecske, amennyiben elektromosan semleges, kitűnő sötét anyag jelölt
  - Bevezethető egy új multiplikatív kvantumszám, az R-paritás  $(-1)^{2s+3(B-L)}$ : SM részecskékre +1, SUSY partnereikre -1 (a baryon- és lepton-szám megmaradást biztosítja)
  - Ha az R-paritás megmarad, akkor a legkönnyebb SUSY részecske stabil
- Az EM, a gyenge és az erős kölcsönhatások ereje (csatolási állandója) jó pontossággal találkozik nagy energián ( $\sim 10^{16}$  GeV) SUSY jelenlétében, a sok új részecske járulékának köszönhetően



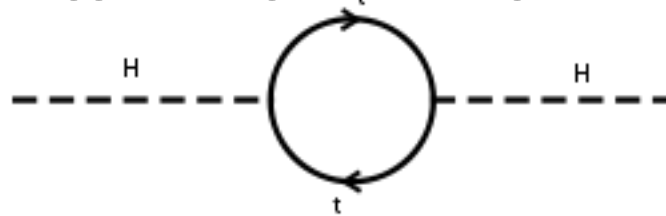
# MIBEN SEGÍT A SZUPERSZIMMETRIA?

## HIERARCHIA PROBLÉMA

- Óriási különbség az energia skálák között
  - elektroyenge kcsh jellemző energiája  $m_W \sim m_Z \sim m_H \sim 100 \text{ GeV}$ ,
  - nagy egyesítés energiája  $\sim 10^{16} \text{ GeV}$
  - Planck skála  $m_{\text{Planck}} = (hc/2\pi G)^{0.5} \sim 10^{19} \text{ GeV}$   
(a kvantum effektusok itt válnak a gravitáció szempontjából fontossá)

- Mi stabilizálja a Higgs bozon tömegét?

A Higgs tömegéhez a magasabb energia skála is ad járulékot.



$$\Delta m_H^2 = -\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} [\Lambda_{UV}^2 + \dots].$$

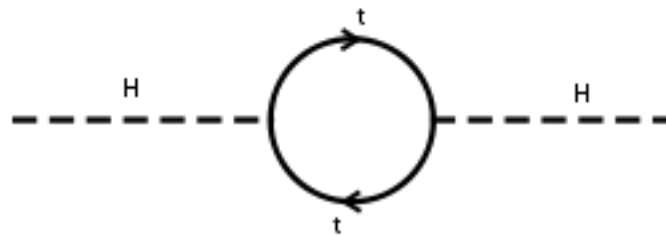
- Hogyan maradhat  $m_H$  az elektroyenge skála környékén?



# MIBEN SEGÍT A SZUPERSZIMMETRIA?

## HIERARCHIA PROBLÉMA

- Óriási különbség az energia skálák között
  - elektrogyenge kcsk jellemző energiája  $m_W \sim m_Z \sim m_H \sim 100 \text{ GeV}$ ,
  - nagy egyesítés energiája  $\sim 10^{16} \text{ GeV}$
  - Planck skála  $m_{\text{Planck}} = (hc/2\pi G)^{0.5} \sim 10^{19} \text{ GeV}$   
(a kvantum effektusok itt válnak a gravitáció szempontjából fontossá)
- Mi stabilizálja a Higgs bozon tömegét?  
A Higgs tömegéhez a magasabb energia skála is ad járulékot.



$$\Delta m_H^2 = -\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} [\Lambda_{UV}^2 + \dots].$$

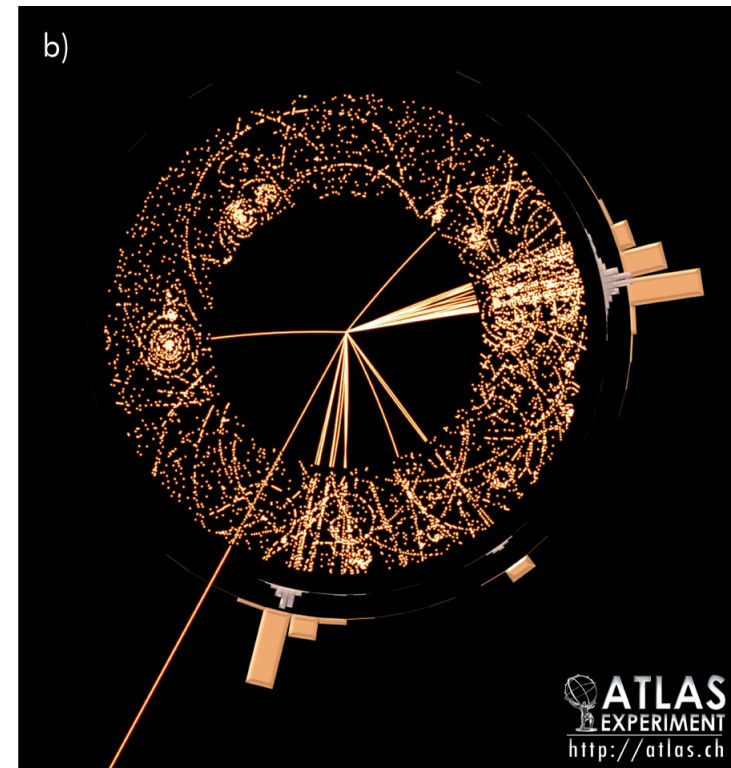
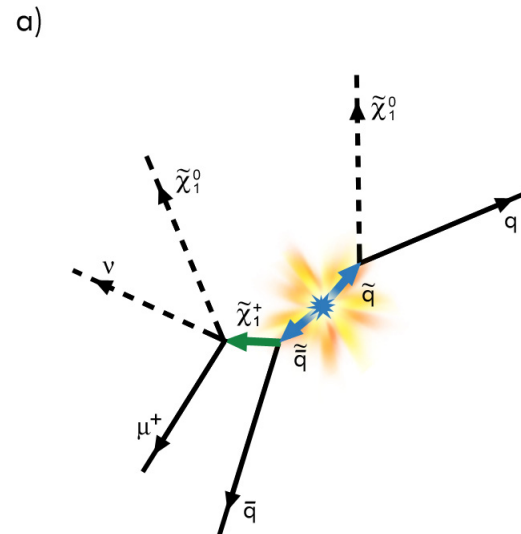


$$\Delta m_H^2 = 2 * \frac{\lambda_S}{16\pi^2} [\Lambda_{UV}^2 + \dots].$$

- Hogyan maradhat  $m_H$  az elektrogyenge skála környékén?
- A SUSY megvédheti a Higgs tömeget a vákum fluktuációktól egészen a Planck skáláig

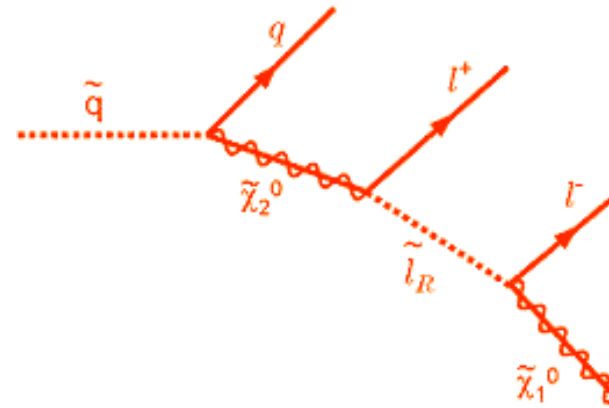
# A TERMÉSZET SZUPERSZIMMETRIKUS?

- Nem látunk a SM részecskékkel megegyező tömegű SUSY partnereket
- A SUSY, ha jelen van, sérül...
- A SUSY részecskék tömegének  $\sim 1$  TeV körül kell lennie, hogy a modell megtartsa jó tulajdonságait
- Ha így van, az LHC-n észlelhetjük őket...



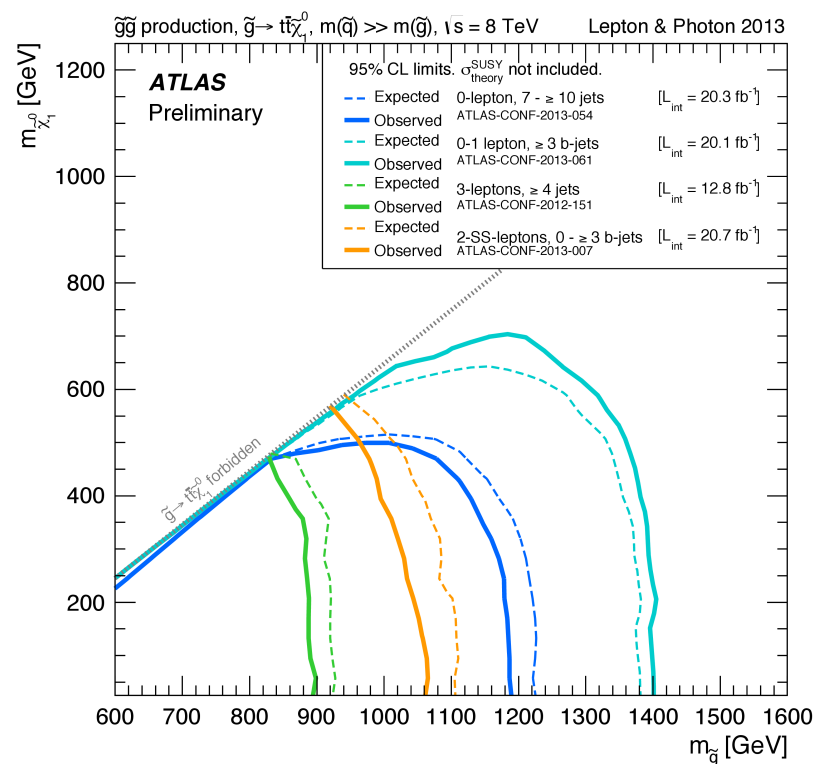
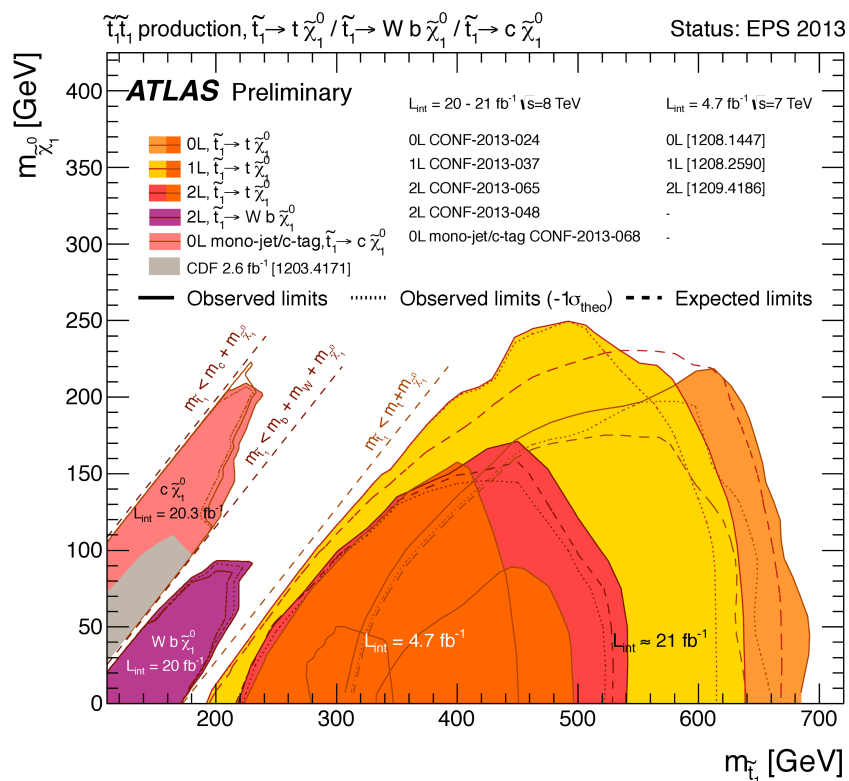
# SUSY KERESÉS

- Keletkezés párban
- Bomlás közönséges és SUSY részecskékre (R-paritás megmaradás!)
- Tulajdonságok modell és paraméter függőek
- Általában a legkönnyebb SUSY részecske (LSP) nem figyelhető meg (semleges, gyengén kölcsönható)  
→ hiányzó energia
- Az LSP természete is a modelltől függ (neutralino, gravitino...)



# A SZUPERSZIMMETRIKUS ELMÉLETEK HÁTRÁNYAI

- Mi a SUSY-sértés mechanizmusa?
- Sok különböző modellt lehet felépíteni
- Rengeteg új paraméter (a legáltalánosabb modellben több mint 100!)
- Az eddigi kísérletekben (LEP, Tevatron, LHC..) nem láttunk SUSY részecskéket...



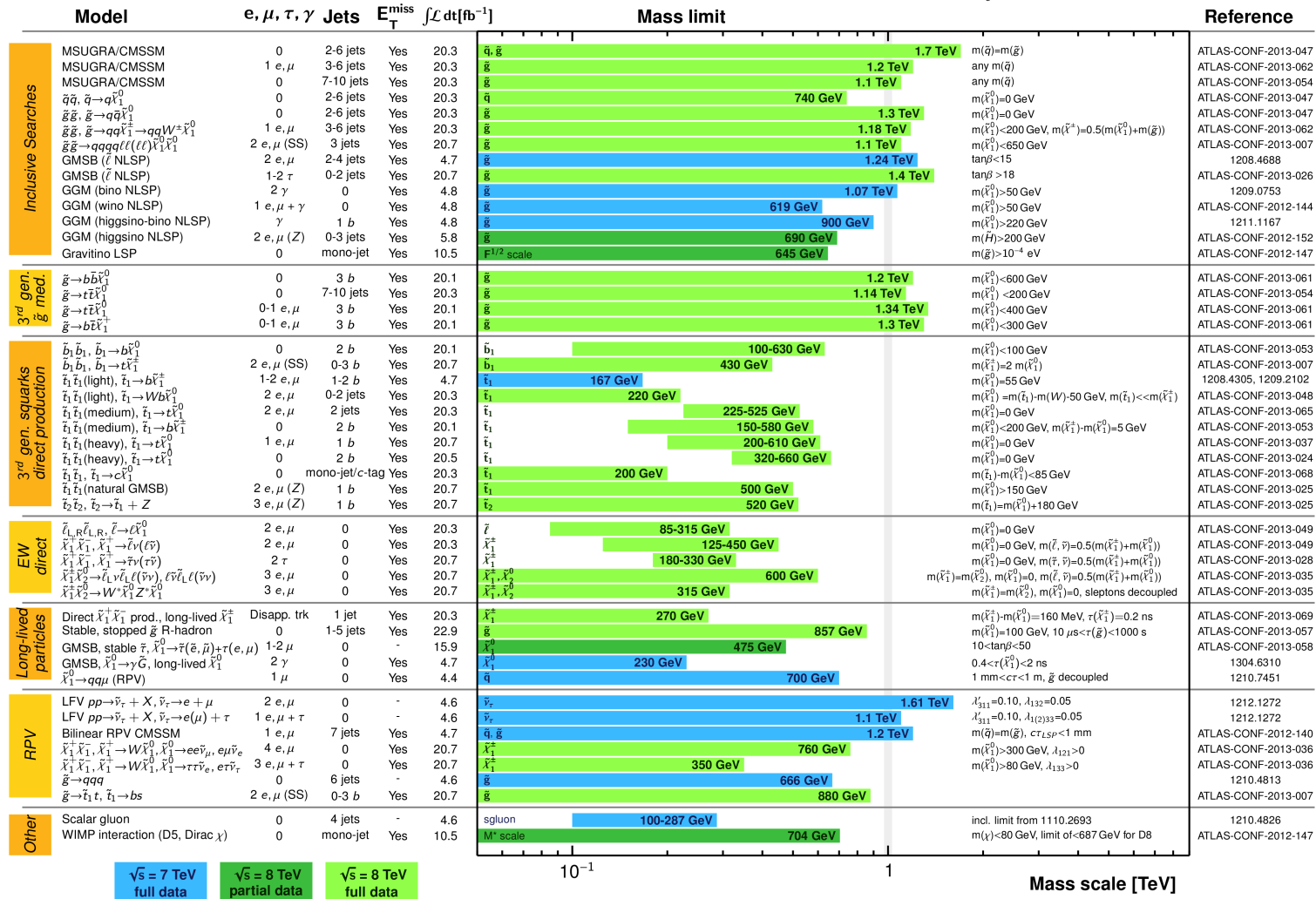
# KORLÁTOK A SUSY RÉSZECSKÉK TÖMEGÉRE (~1 TeV)

## ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: EPS 2013

ATLAS Preliminary

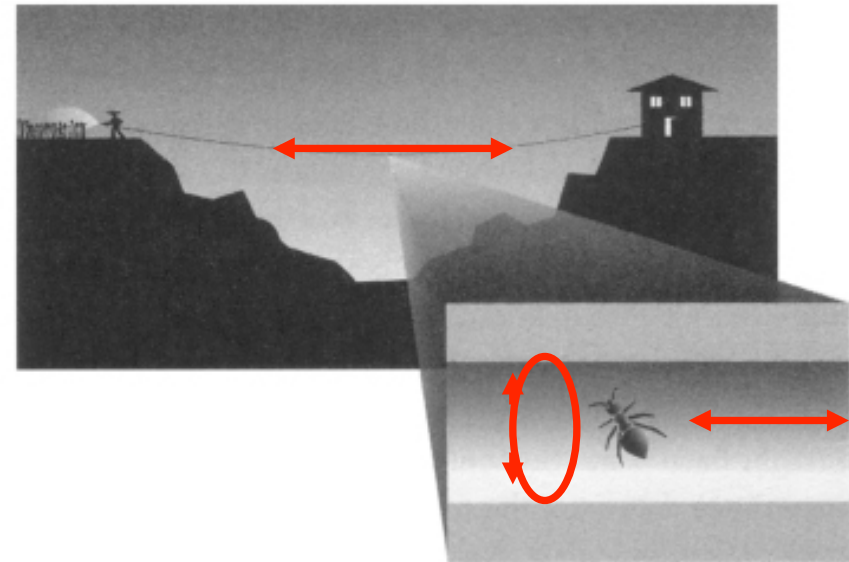
$$\int \mathcal{L} dt = (4.4 - 22.9) \text{ fb}^{-1} \quad \sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$$



\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus 1 $\sigma$  theoretical signal cross section uncertainty.

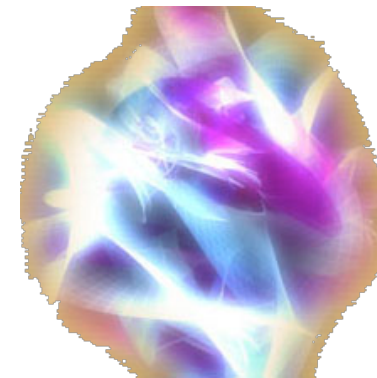
# TOVÁBBI TÉRBELI DIMENZIÓK

- Mi a dimenzió?  
Azon koordináták száma, amelyek szükségesek egy pont helyének megadásához, térben és időben
- Hogyan lehetségesek további / extra térbeli dimenziók (ED)?
- A 3D tér minden pontjába képzeljük el nagyon kicsi felcsavarodott (kompakt) dimenziókat
- A nagyon kicsi dimenziókat nem tudjuk észlelni és hatásuk sem érezhető nagyobb skálákon

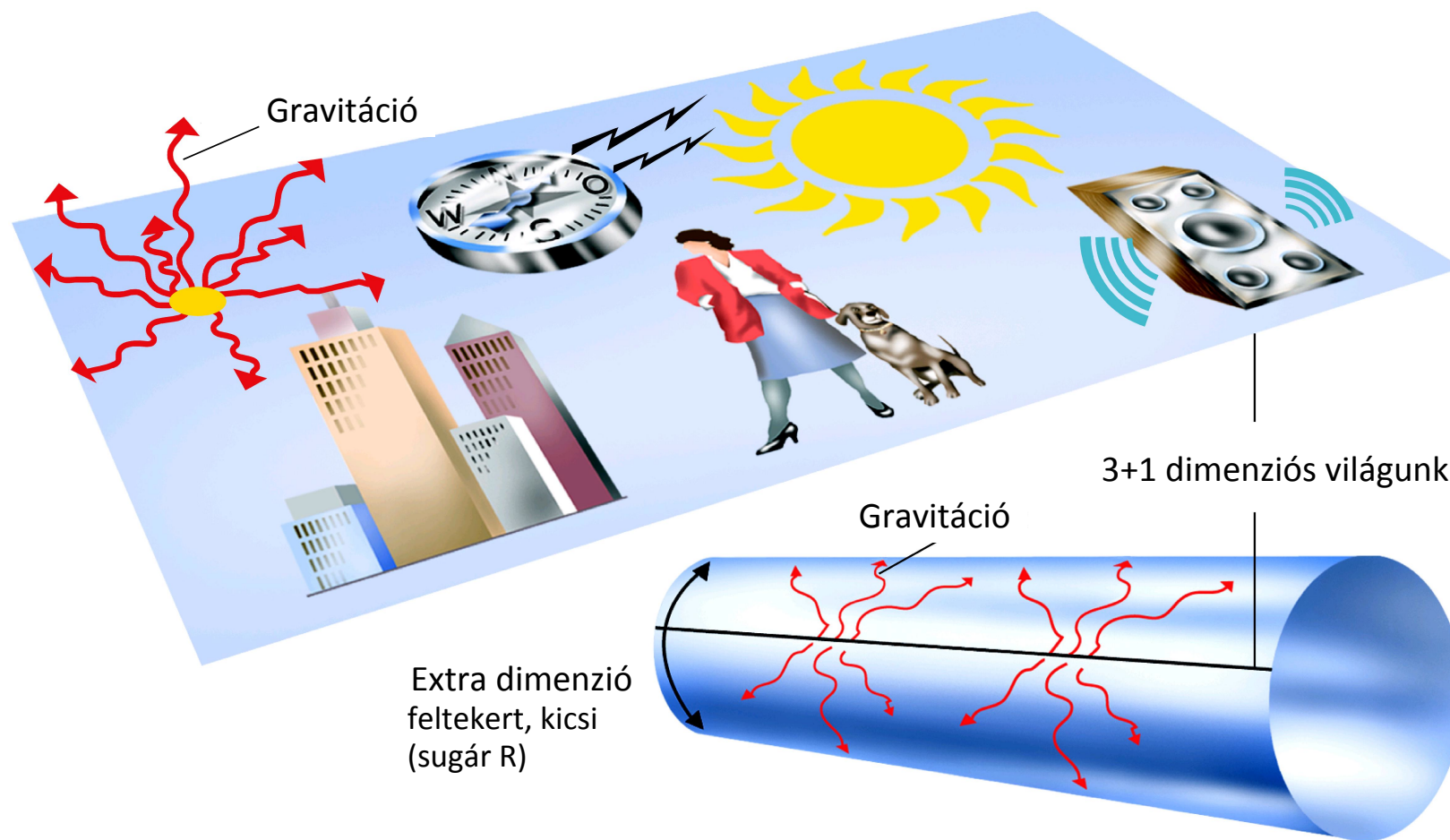


# MIÉRT JÓK AZ EXTRA DIMENZIÓK?

- 1919-ben Theodor Kaluza a gravitáció és az elektromágnesesség egyesítésének problémáján dolgozva észrevette, hogy egy új felcsavarodott dimenziót hozzáadva a szokásos általános relativitáselméletbeli tér-időhöz vissza kaphatjuk a Maxwell-egyenleteket
- Bár az Oskar Klein által finomított elmélet ellentmond a megfigyeléseknek, az ED-k kulcsfontosságúak a gravitáció és a többi kölcsönhatás egyesítéséhez
- A húrelmélet ED létezését jósolja
- 1998-ban az ED-s elméletek újra felvirágoztak, mert felmerült a sub-mm méretű, a közeljövő technikájával észlelhető dimenziók létezésének lehetősége
- Az elmúlt néhány évben ED-k feltételezésével lehetséges válaszok születtek a részecskefizika nyitott kérdéseire, például
  - A gravitációs kölcsönhatás gyengesége
  - A Higgs bozon “természetes” tömege
  - A fermion tömegek magyarázata
  - A sötét anyag természete
  - A szuperszimmetria sértése



# A NAGY ED ADD MODELLE



Gravitáció gyenge 3+1 dimenzióban a rejtett térfogat miatt:

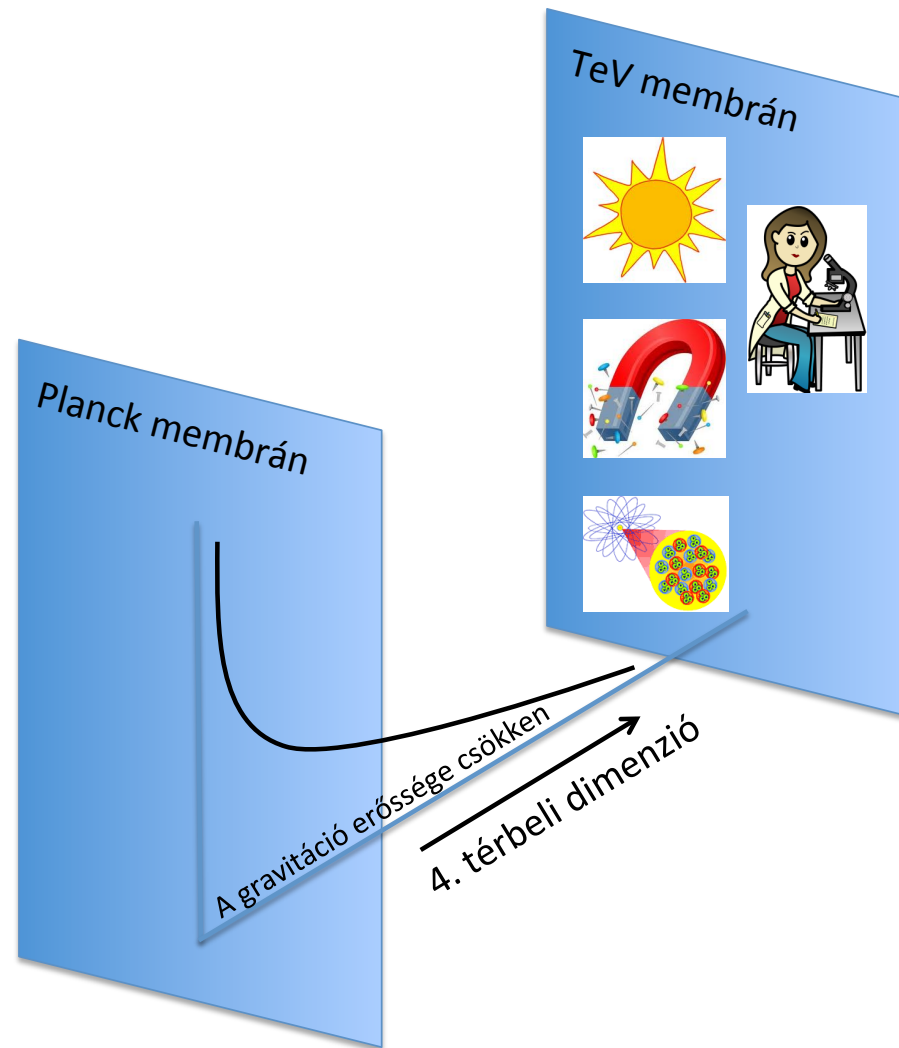
$$M_{\text{Planck}}^2 = V_n M_{\text{Planck}[4+n]}^{2+n}$$

Gravitációs potenciál módosul  $r \ll R$  esetén:

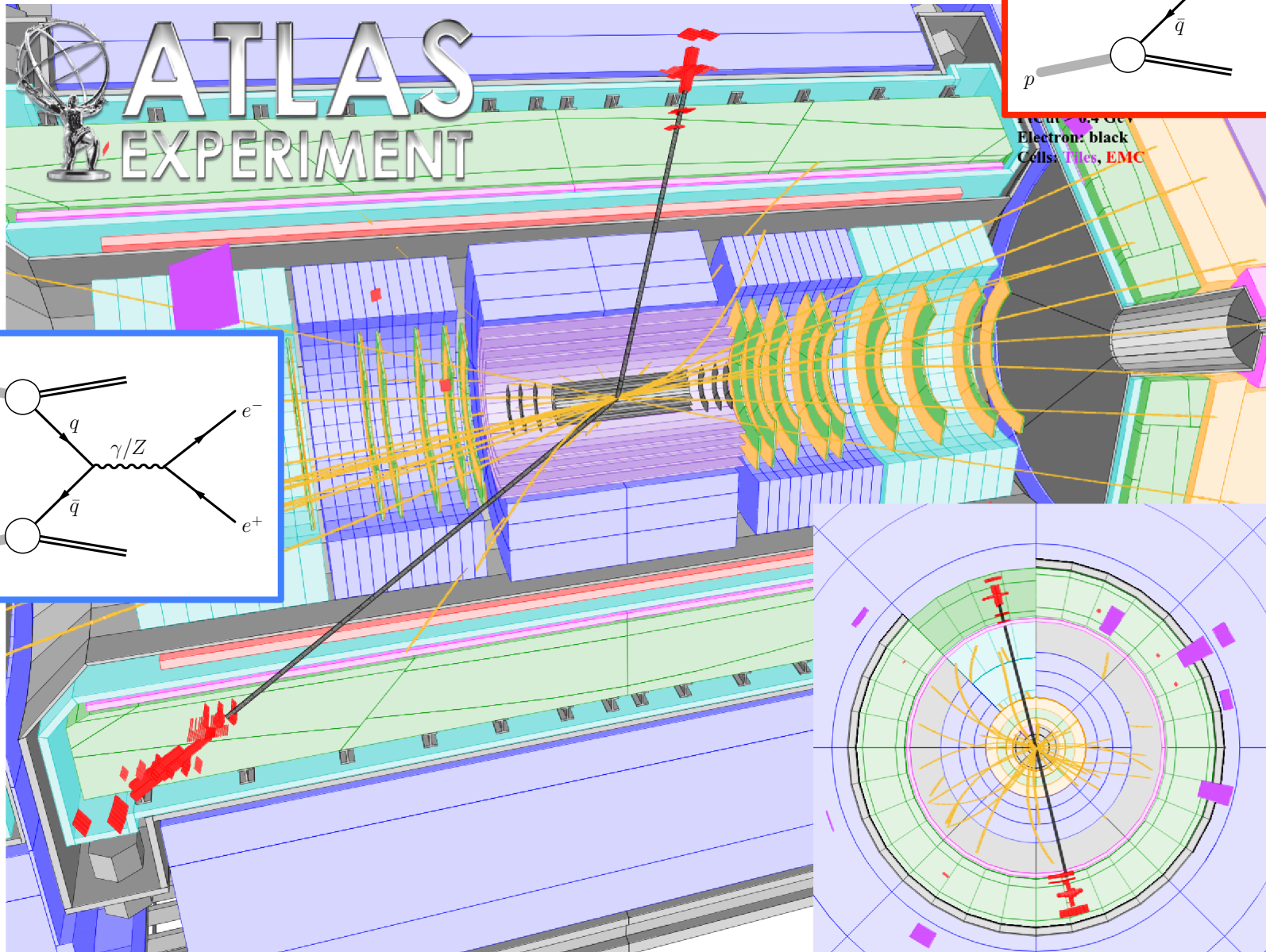
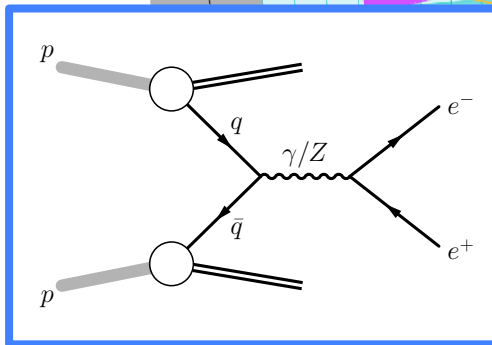
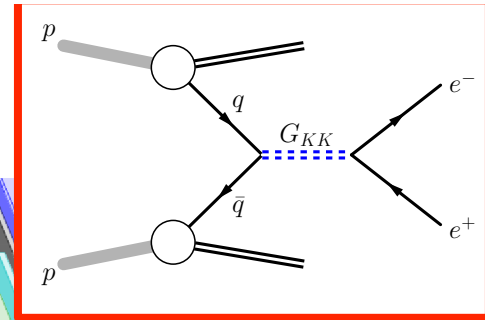
$$V(r) = m_1 m_2 / M_{\text{Planck}[4+n]}^{2+n} r^{1+n}$$



# RANDALL-SUNDRUM ED MODELL

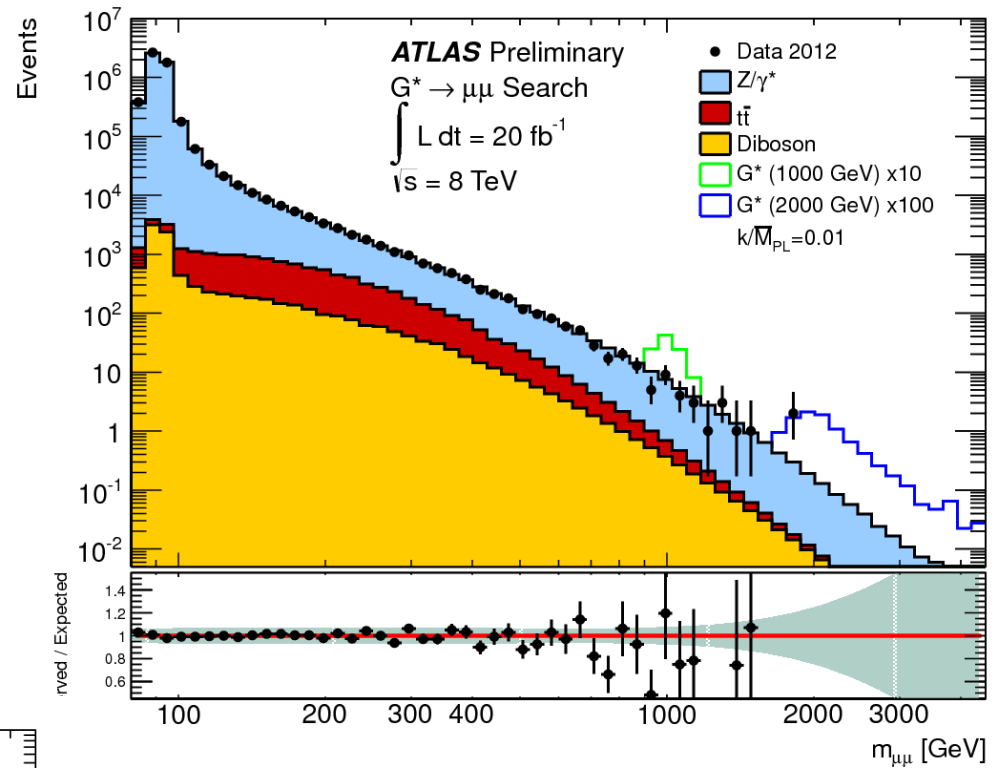
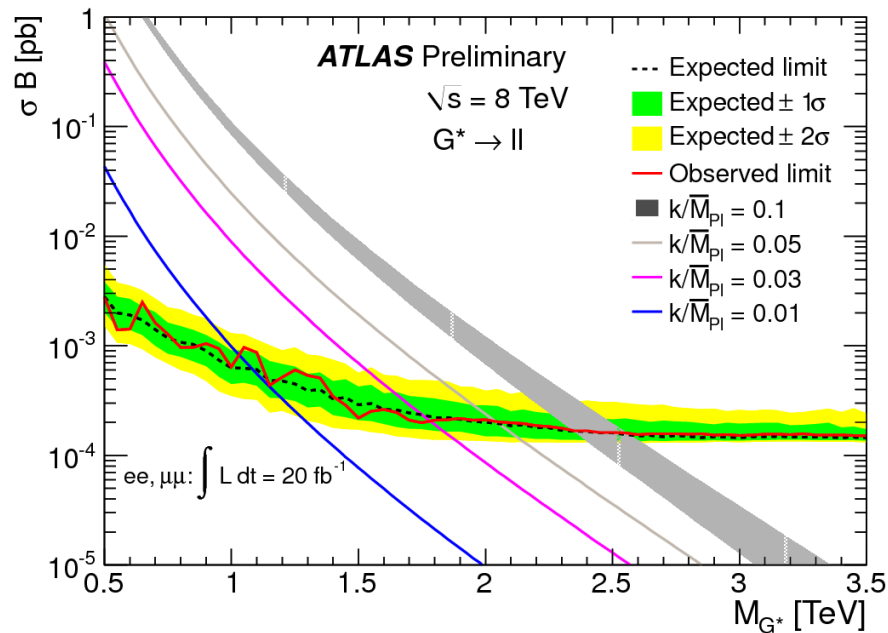


# EXTRA DIMEZIÓKAT KERESVE...

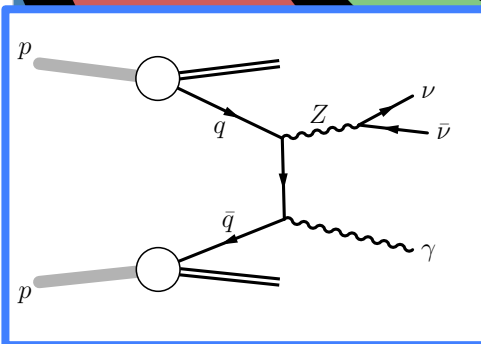
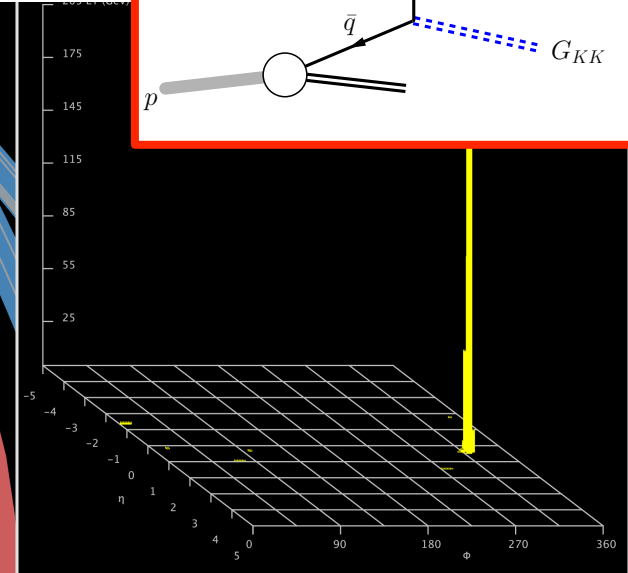
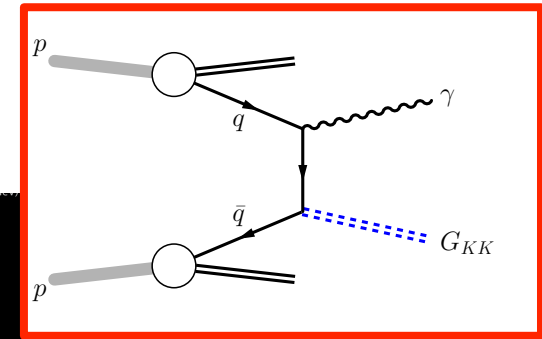
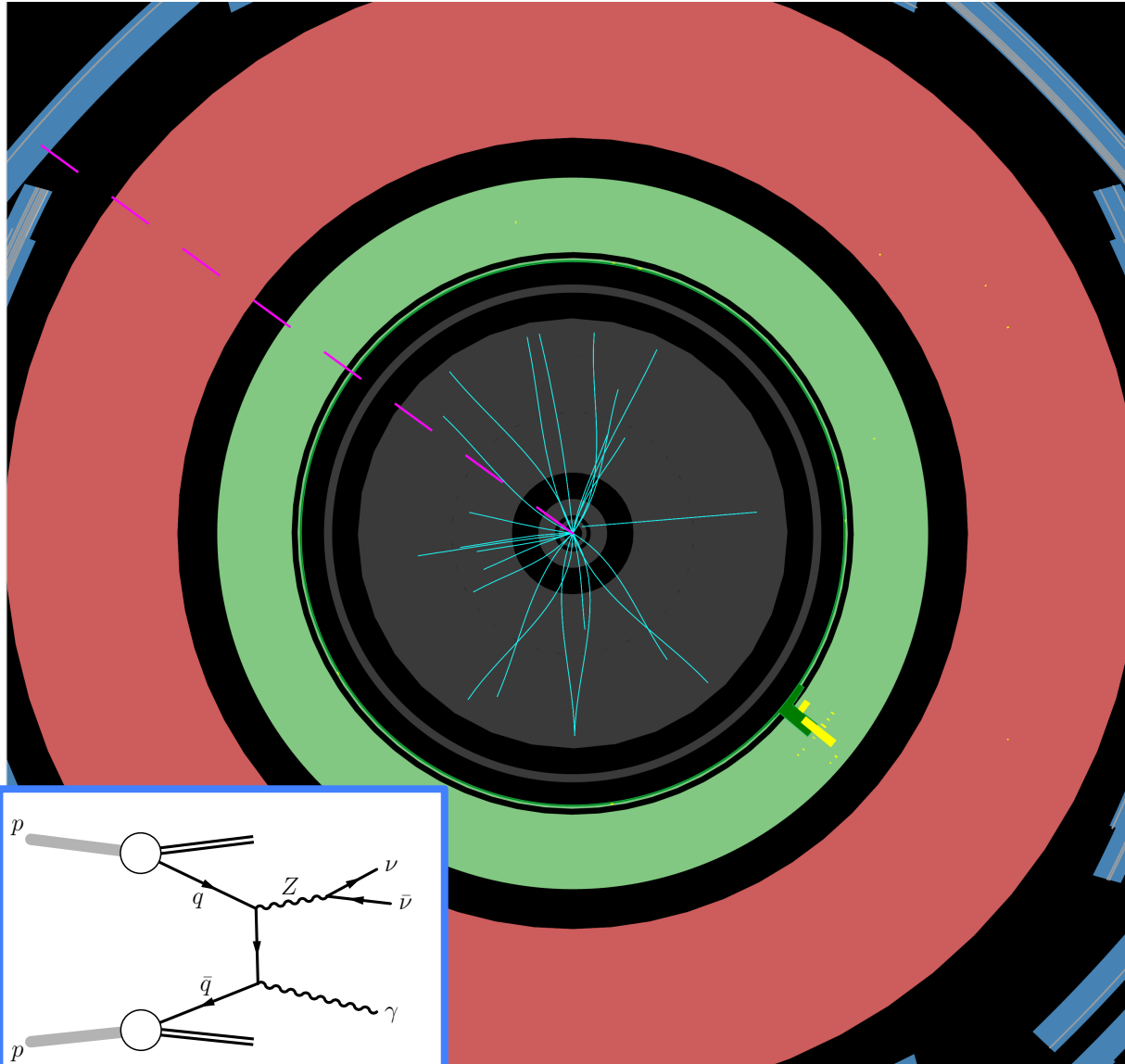


Electron: black  
Cells: Tiles, EMC

# KK GRAVITON KERESÉS EREDMÉNYEI



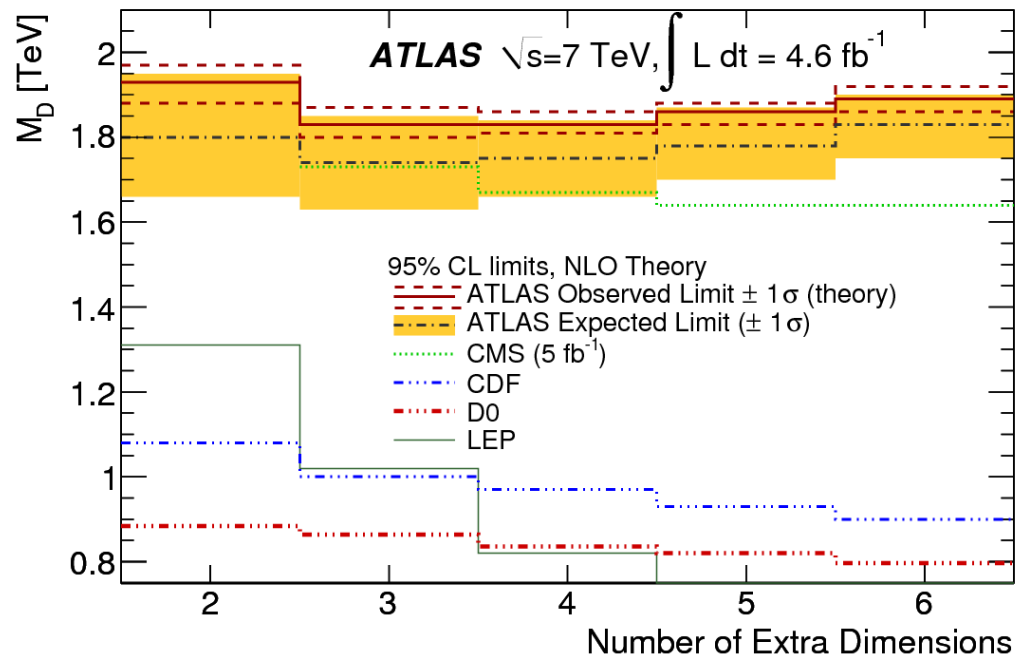
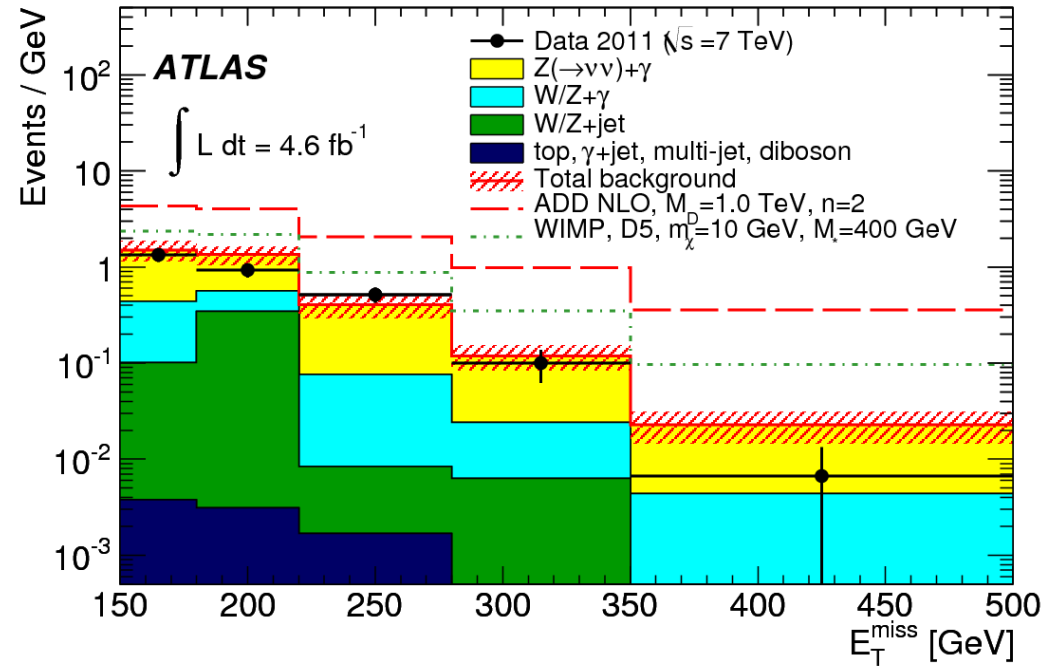
# EXTRA DIMEZIÓKAT KERESVE...



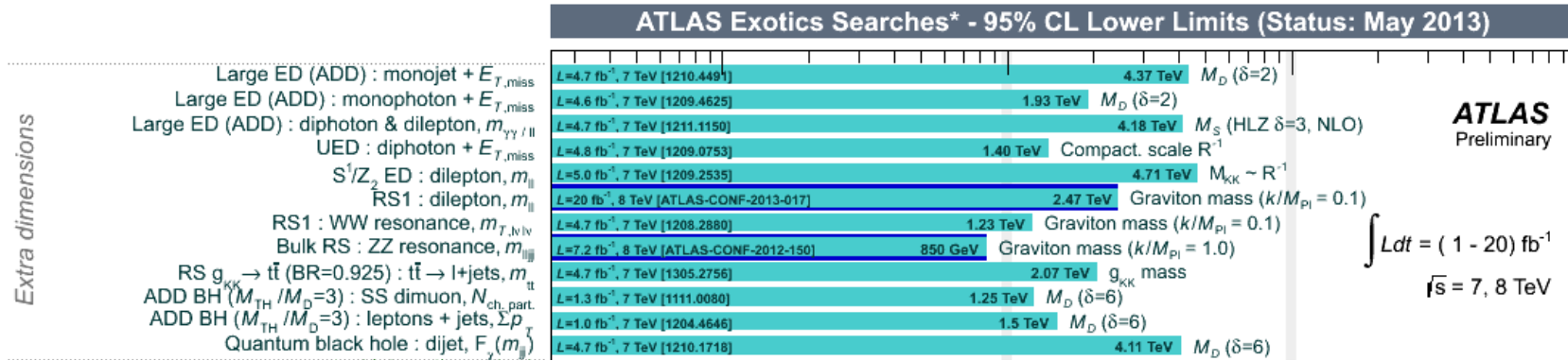
Run Number: 179710, Event Number: 19174449

Date: 2011-04-15 03:48:32 CEST

# KK GRAVITON KERESÉS EREDMÉNYEI

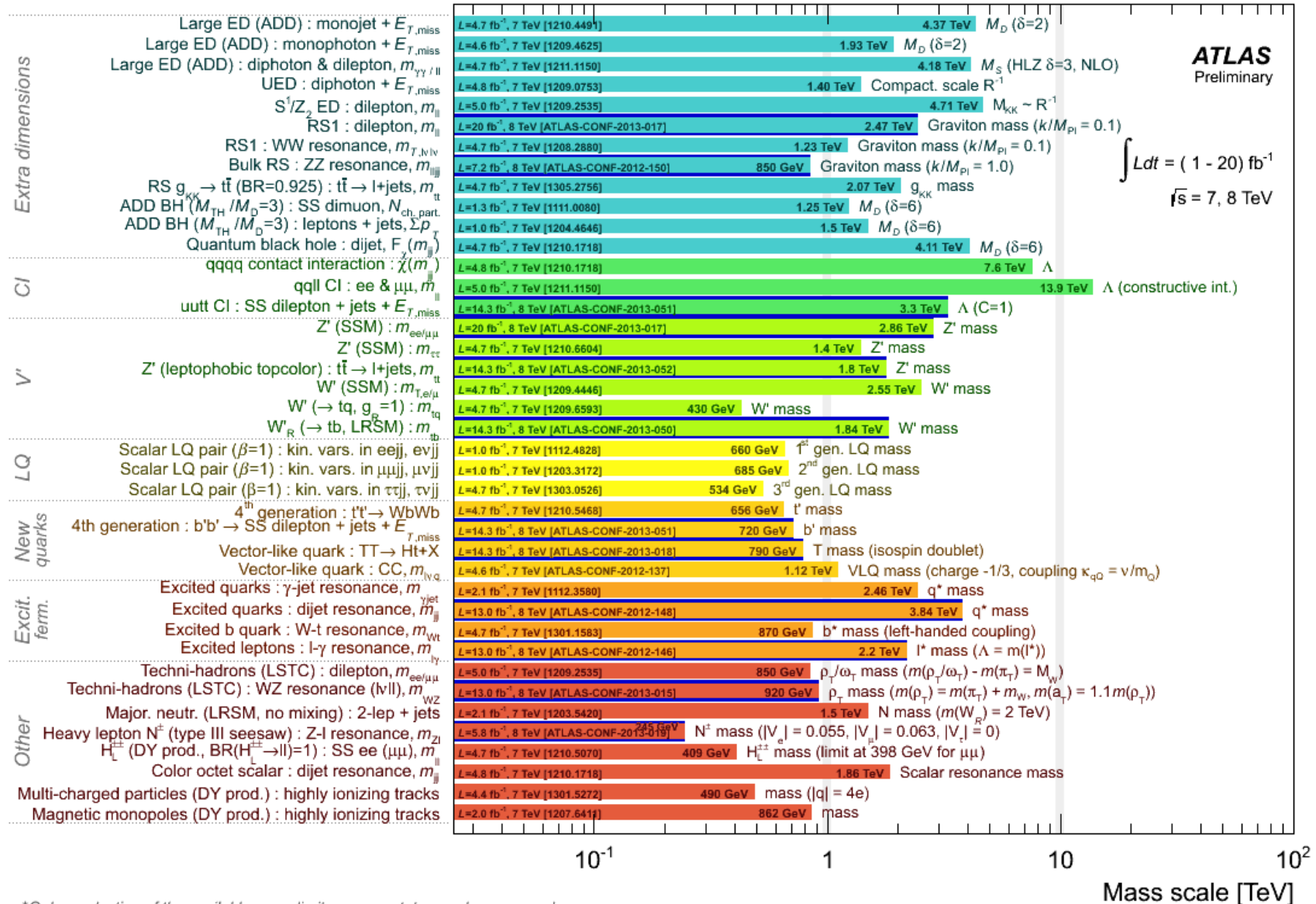


# KORLÁTOK ED ELMÉLETEK PARAMÉTEREIRE



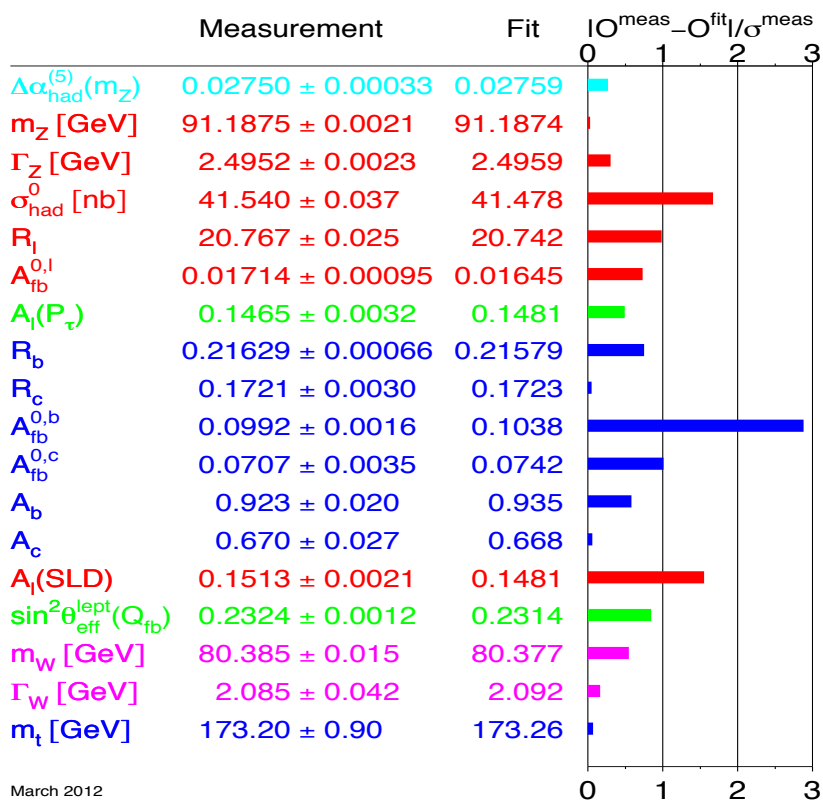
# STANDARD MODELEK TÚL KORLÁTOK ÉS ELMELETEK PARAMÉTEREIRE

ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Lower Limits (Status: May 2013)

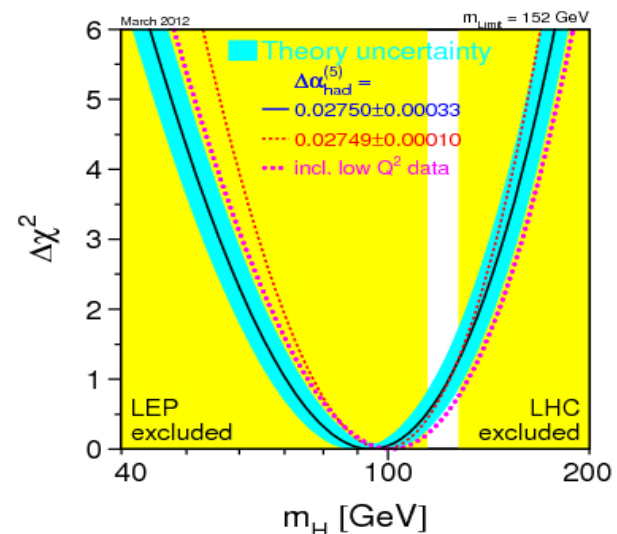
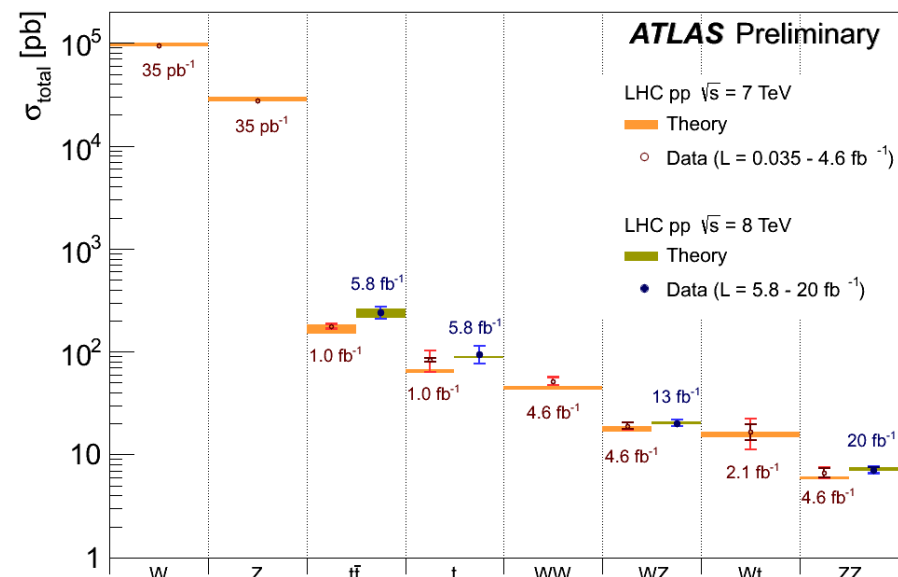


\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena shown

# A STANDARD MODELL MEGLEPŐEN JÓL MŰKÖDIK



March 2012

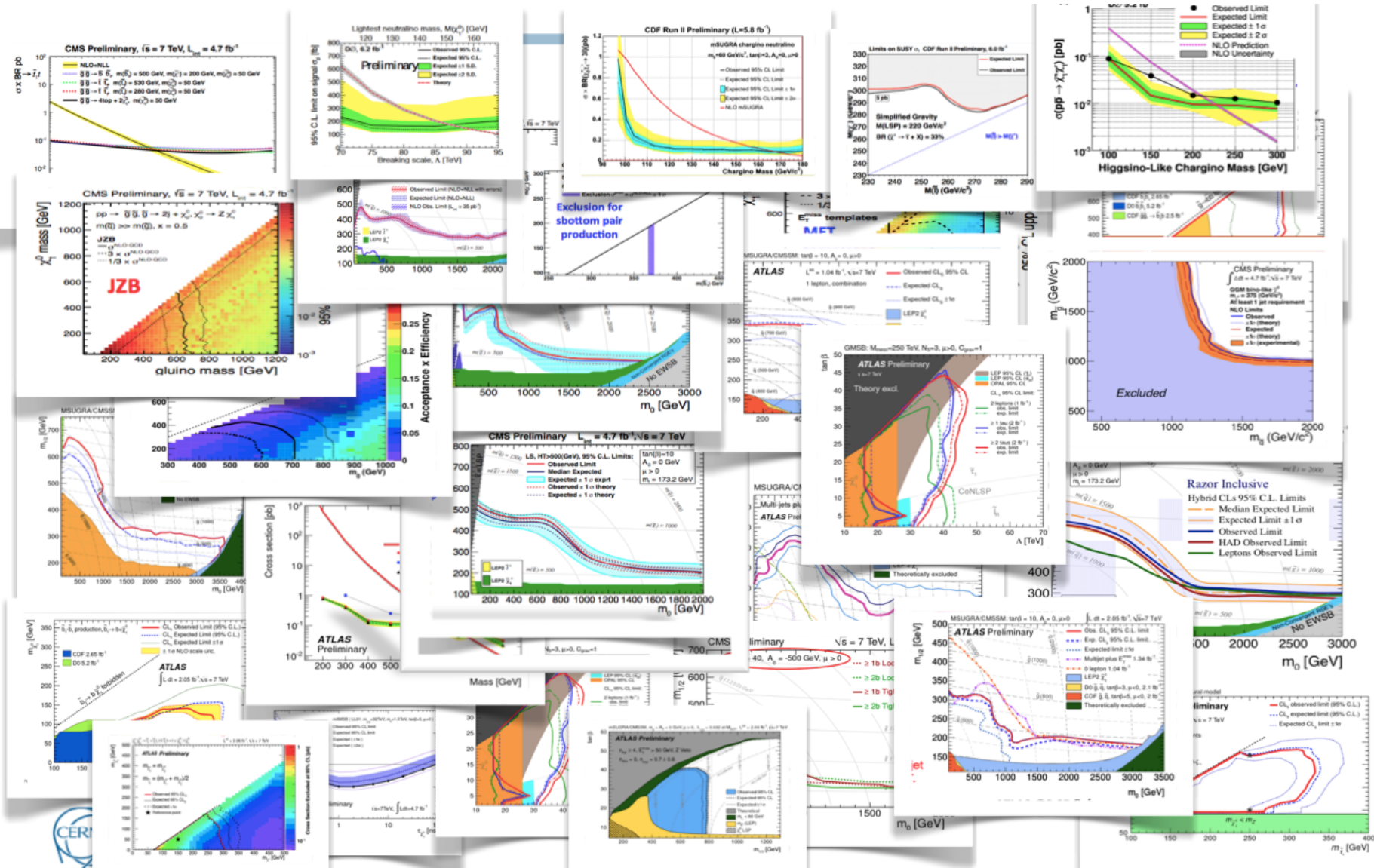


## ABLAKOK a SM-EN TÚLRA

- A Higgs-bozon tulajdonságainak vizsgálata
- Új jelenségek keresése az LHC-n
- Neutrínók vizsgálata
- Nagy pontosságú mérések b-hadron bomlásokban
- ...



# KERESNI, KERESNI, KERESNI...



# A JÖVŐ?

- Asztrofizikai megfigyelések
- Földalatti neutrínó és sötét anyag detektorok adatai
- Részecske gyorsítók eredményei
- Gondos munka
- Nyitott elme
- Lelkes fiatalok

szükségesek, hogy **megértsük**  
a világ törvényszerűségeit

