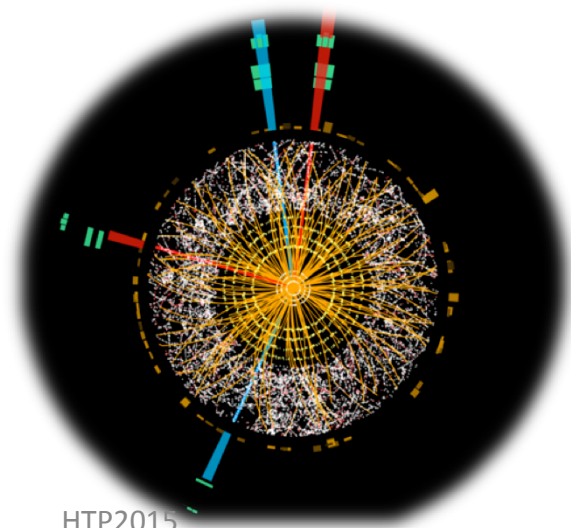


BEVEZETÉS A RÉSZECSEFIZIKÁBA 3.

Gabriella.Pasztor@cern.ch

CERN Hungarian Teachers Programme

2015. augusztus 17-21.



HTP2015

Pásztor: Bevezetés a részecskefizikába



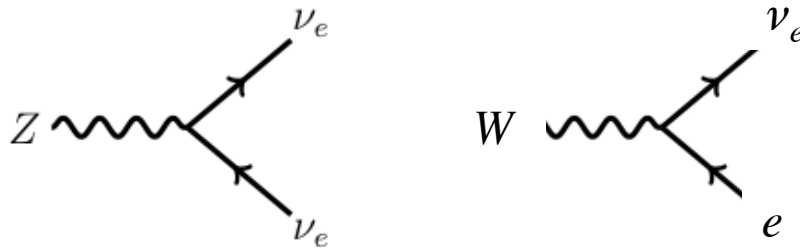
151

3. RÉSZ

Neutrínók

Neutrínó emlékeztető:

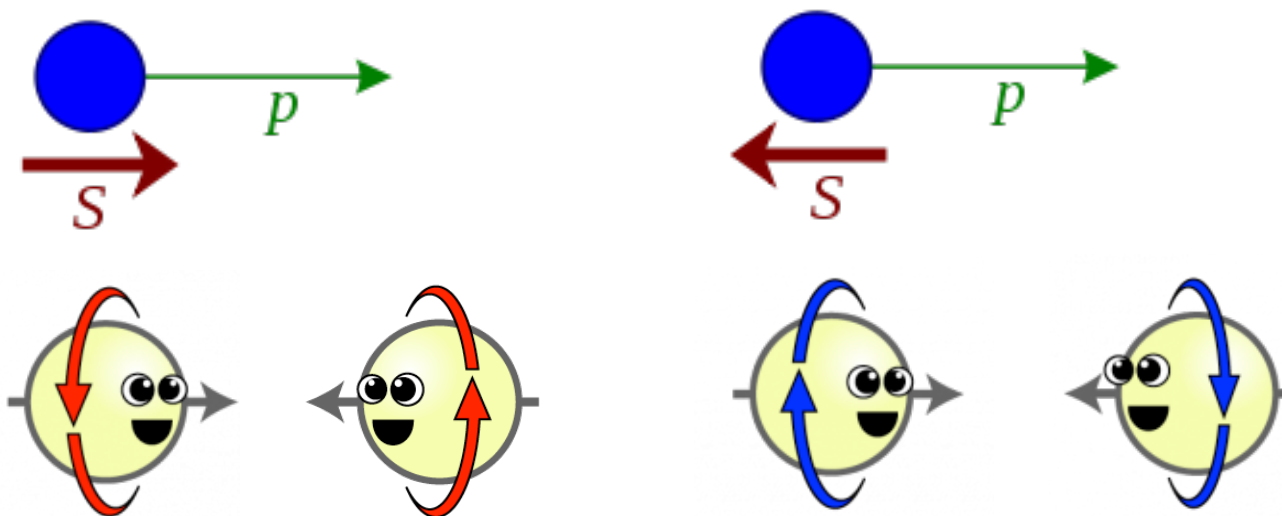
- Elektromosan semleges lepton
- Csak a gyenge kcsb-ban vesz részt



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

KIRALITÁS

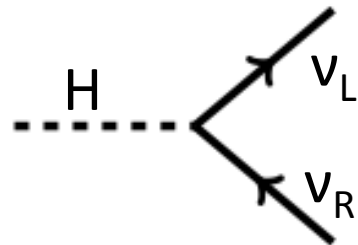
- Kiralitás vagy kezesség a részecskék egy belső tulajdonsága, arra jellemző, hogyan viselkedik egy részecske tértükrözésre
- 0-tömegű részecskékre, kiralitás = helicitás $h = \mathbf{S} \cdot \mathbf{p}$
Jobb-kezes, $h=1$ Bal-kezes, $h=-1$



- 0-tömegű (= fénysebességgel mozgó) részecskék helicitása egy belső tulajdonság
- Elemi részecskék, lehetnek jobb- vagy bal-kezesek (pl. e_L , e_R)
- A megfigyelhető “fizikai” részecskék, a jobb- és bal-kezes állapotok keverékei (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

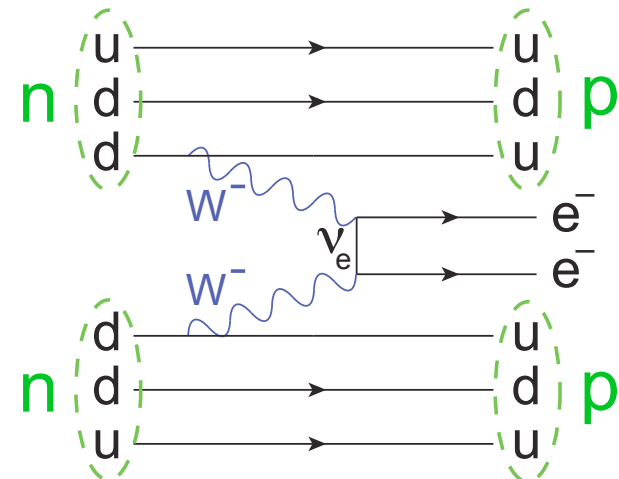


- A neutrínók tömegét tehát pontosan 0-nak feltételezték
- Régóta sejtették és 2001-ben kísérletileg bizonyították: a neutrínók tömege kicsi, de nem nulla
- A SM-t módosítani kell
- Beköszöntött a “neutrínó korszak”

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

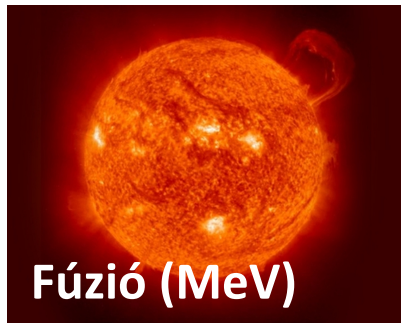
A NEUTRÍNÓK TERMÉSZETE: DIRAC VAGY MAJORANA?

- Egy töltött részecske és anti-részecske társa mindig különböző, hiszen töltésük különböző, pl. elektron és pozitron
- A semleges részecskéknél mindkét eset előfordulhat:
 - γ , Z , π^0 és anti-részecske társuk megegyeznek
 - K^0 , n különböznek anti-részecske társuktól
- Nem ismerünk még olyan fermiont, 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 (de még nem eldöntött!):
ha ν majorana, neutrínó nélküli dupla β -bomlás lehetséges (ugyanazt a részecskét kibocsájthatja és elnyelheti a neutron)
- A válasz utat mutatna a SM kibővítésének módjára

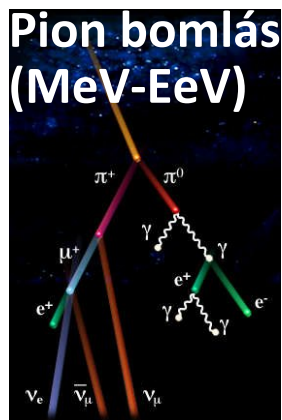


NEUTRINÓ KELETKEZÉS

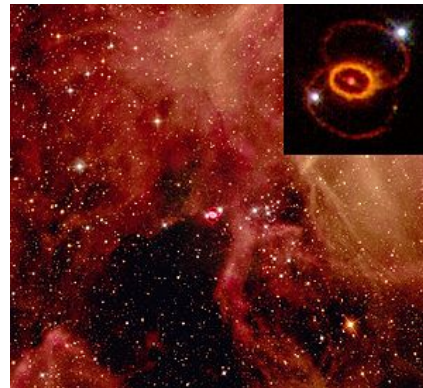
A természetben keletkeznek
a Napban,



a légkörben,



szupernovákban,



élőlényekben, ...



Előállíthatjuk őket
atomreaktorban,

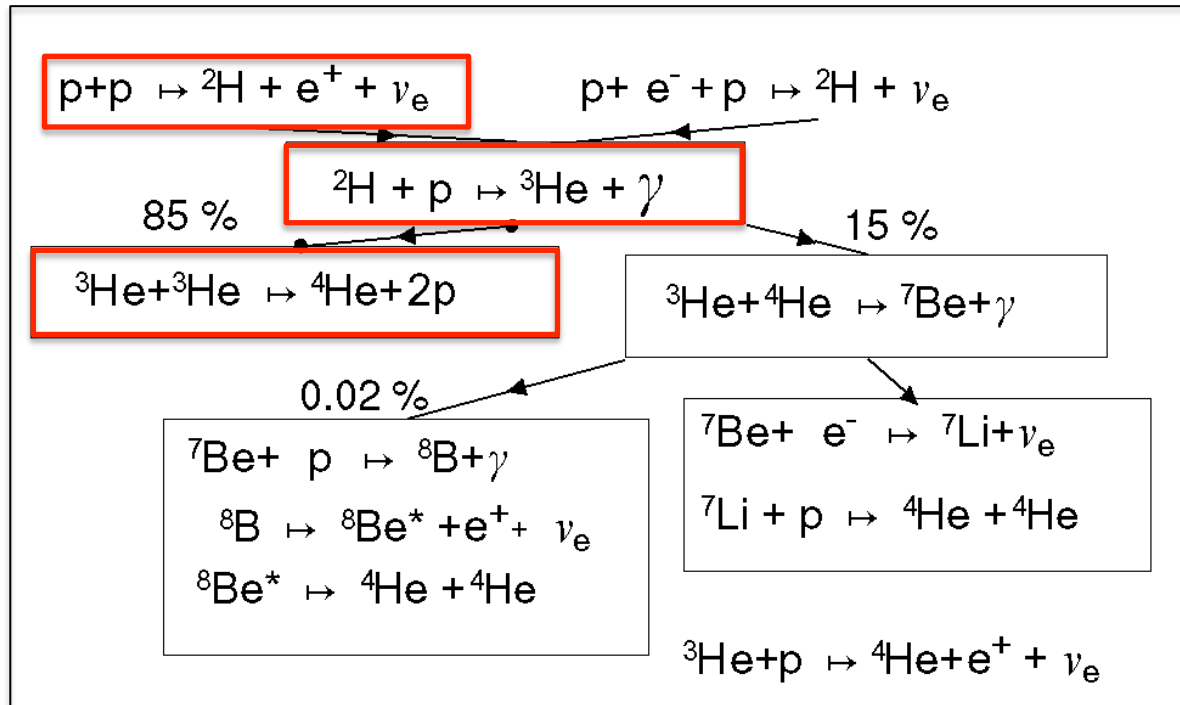
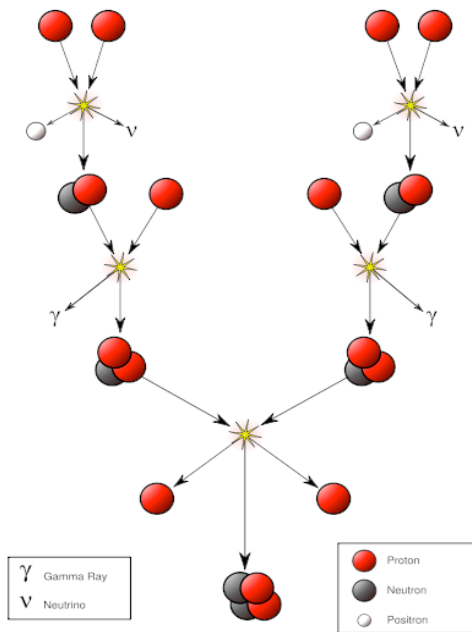
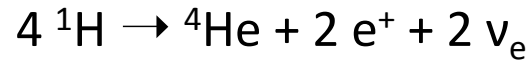


részecskegyorsítókkal



A NAP NEUTRÍNÓI

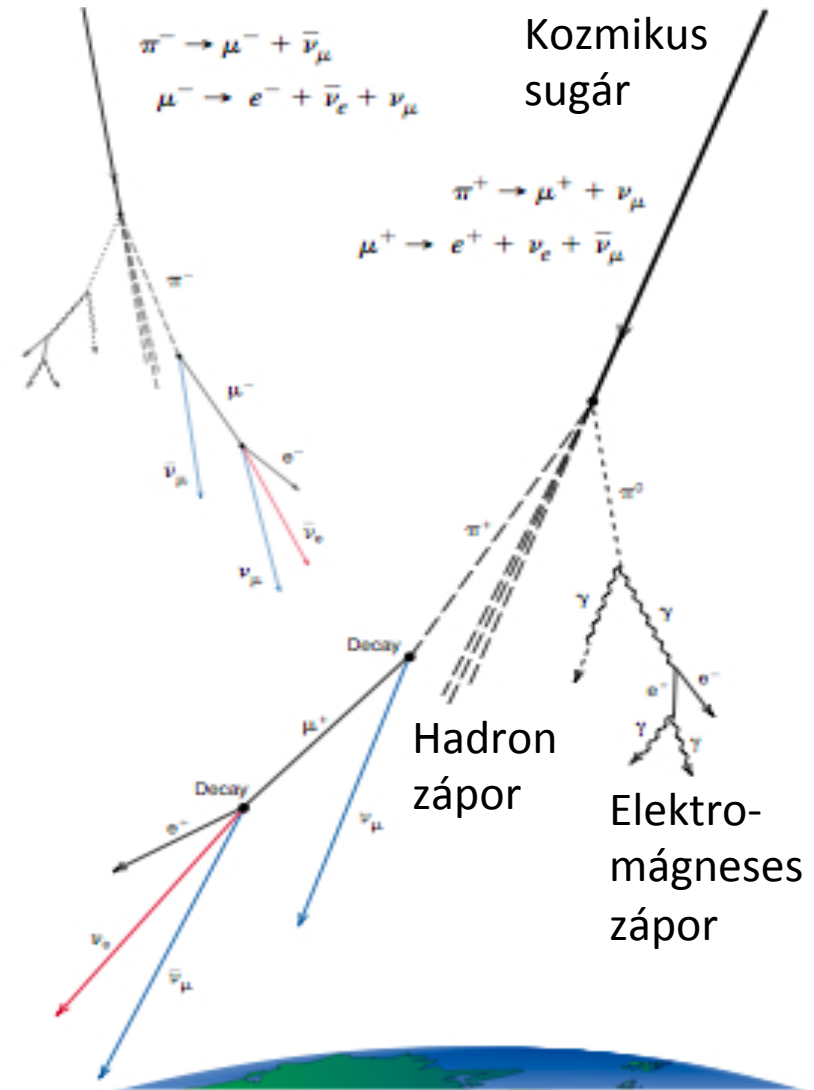
Magfúzió:



- Elektron neutrínók 10^8 km távolságról
- Nagy tömegű detektorokkal vizsgálják (10-10 000 t)
- Első eredmény 1968-ban a Homestake detektorral ($\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$, 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

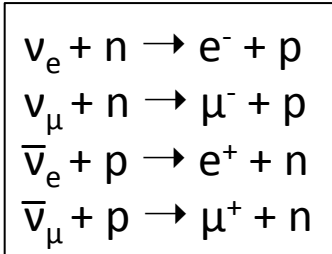
LÉGKÖRI NEUTRÍNÓK

- 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 ν_e és $2\nu_\mu$, anti-neutrínók is
- Mért $N(\nu_\mu)/N(\nu_e) \ll 2$



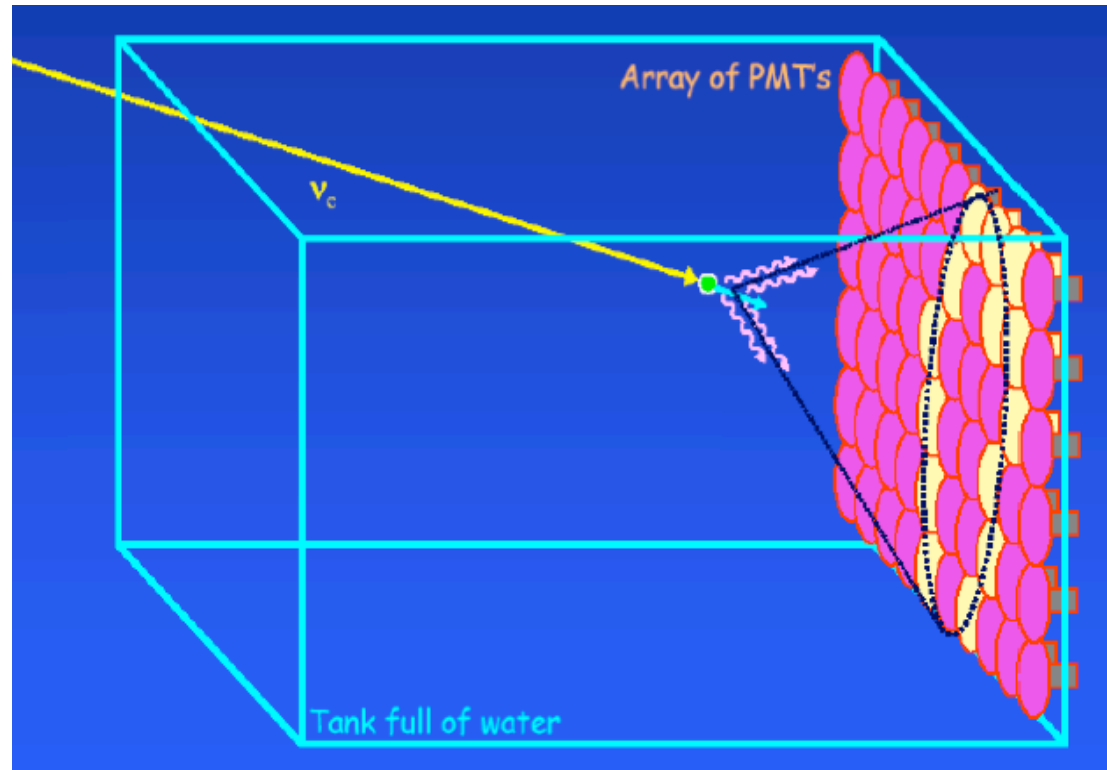
NEUTRÍNÓ KÍSÉRLETEK BÁNYÁBAN, TENGHERFENÉKEN, JÉGBEN REAKTOR KÖZELÉBEN VAGY GYORSÍTÓVAL MEGCÉLOZVA





NEUTRÍNÓ ÉSZLELÉS VÍZBEN

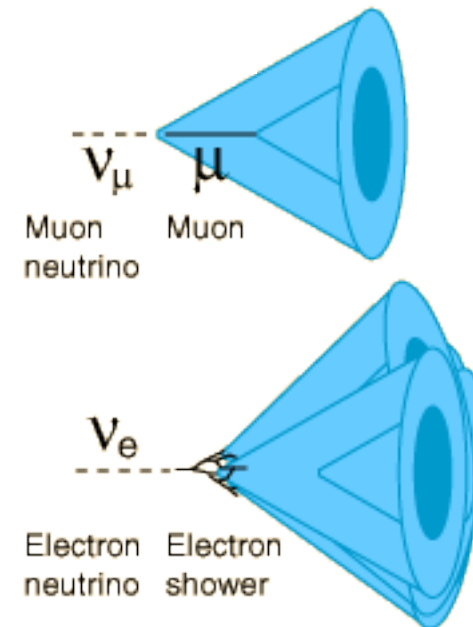
Gyengén kölcsönható → Anyagon általában zavartalanul áthalad
 → Óriási tömegű detektorokra van szükség, hogy észlelhessük



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

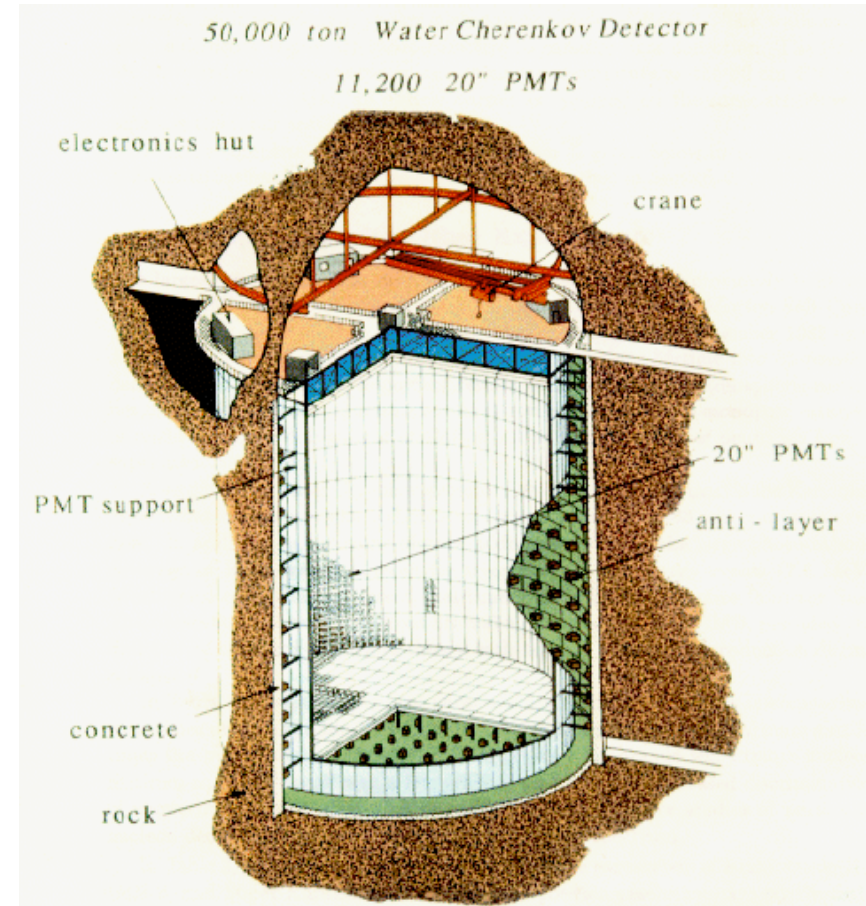
Ellipszis alakja, a PM csövek jelének időzítése, lehetővé teszi az irány meghatározását

Elektron-neutrínók és muon-neutrínók megkülönböztetése



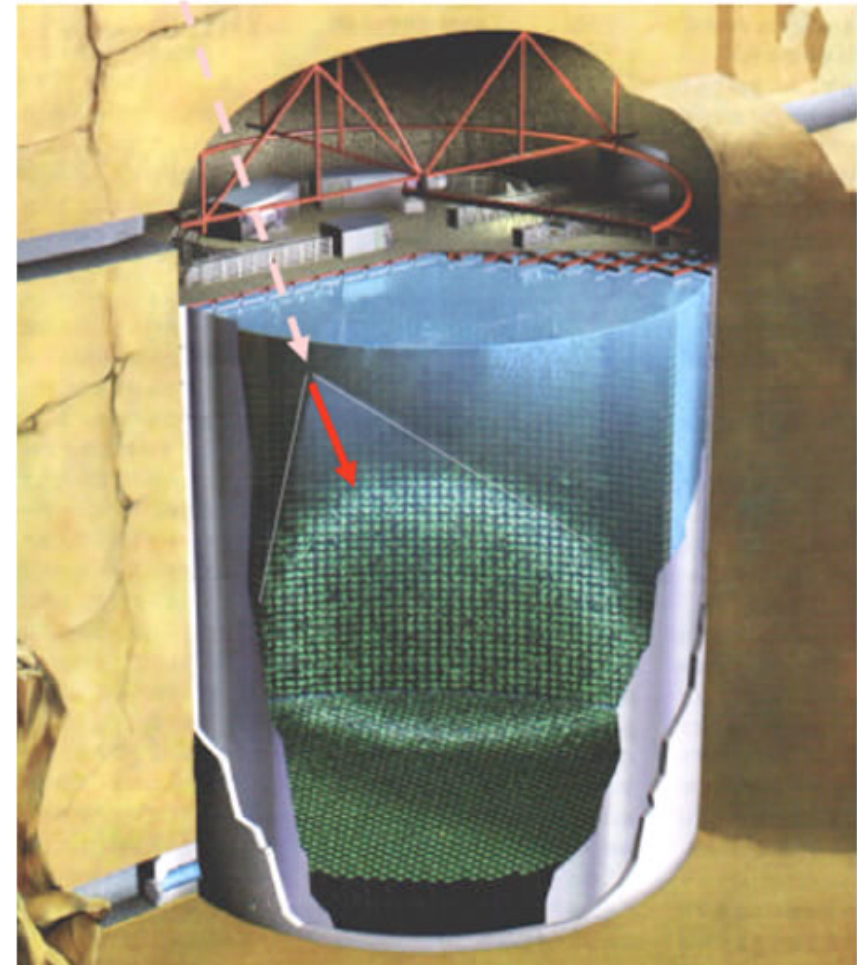
SUPER-KAMIOKANDE (SKK)

- Kamioka Nucleon Decay Experiment
- 1000 m mélyen a Kamioka bányában Japánban
- Belső detektor:
 - \varnothing 39 m \times 42 m tartály
 - 50 000 t tiszta H₂O
 - 11 146 PMT (\varnothing 51 cm)
- Külső detektor
 - Vétó átfutó e, μ , n, γ
 - 2 m vastag H₂O
 - 1 885 PMT (\varnothing 20 cm)
- Neutrínók a Napból, a légkörből és gyorsítókból
- Méri irányuk, energiájuk, fajtájuk

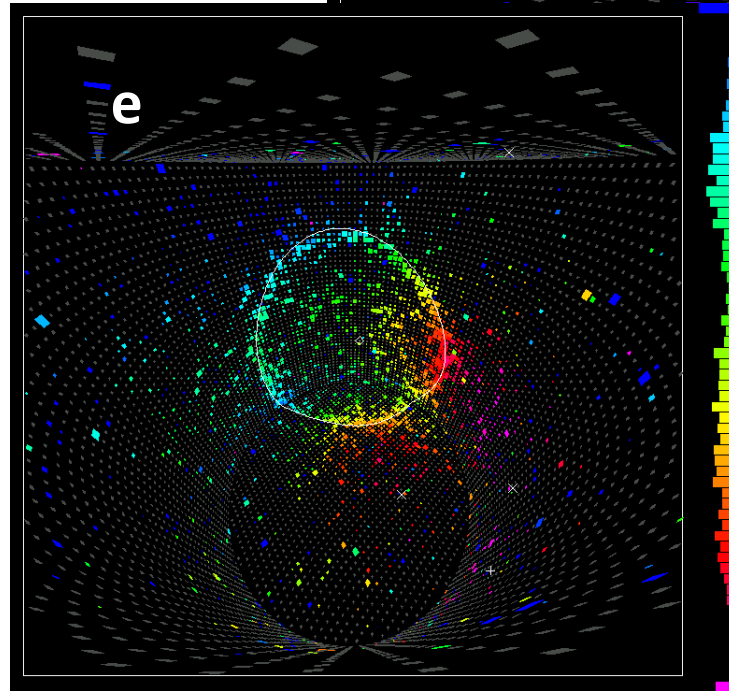
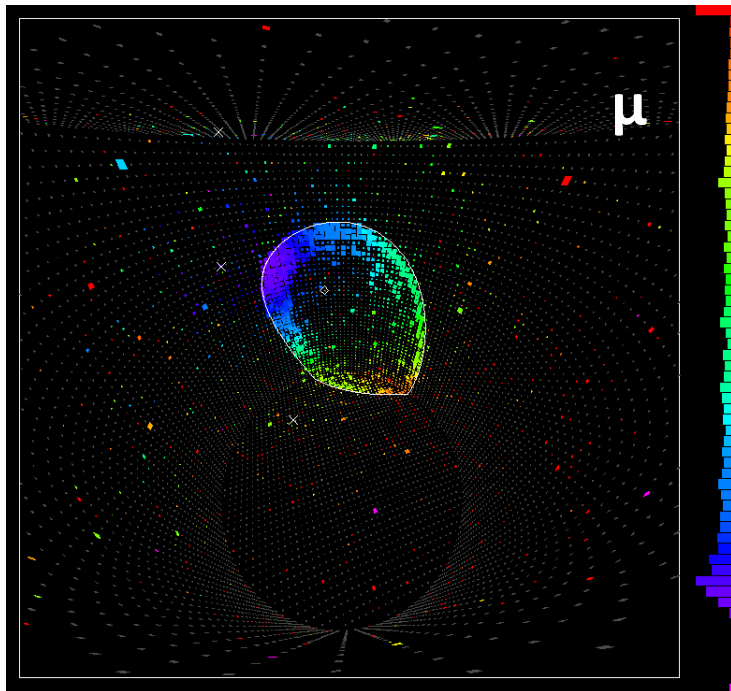
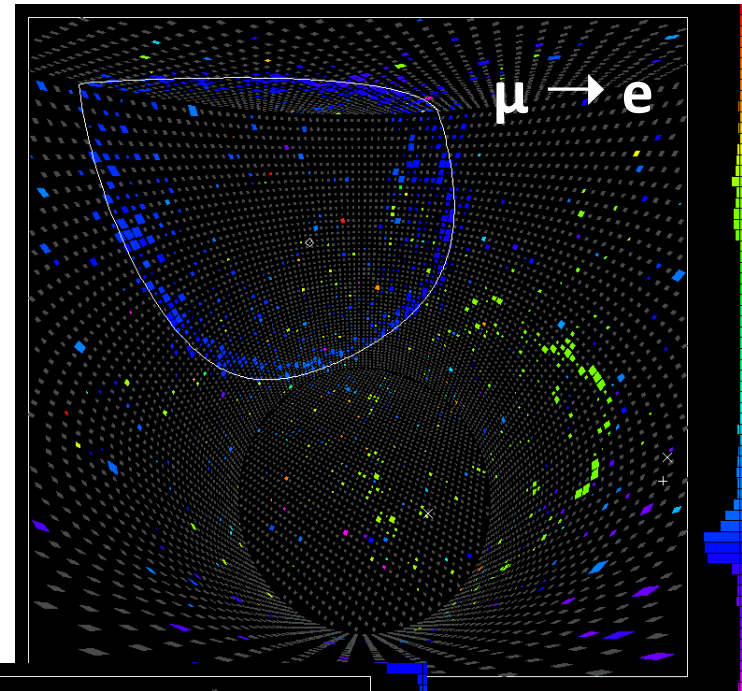


SUPER-KAMIOKANDE (SKK)

- Kamioka Nucleon Decay Experiment
- 1000 m mélyen a Kamioka bányában
- Belső detektor:
 - \varnothing 39 m \times 42 m tartály
 - 50 000 t tiszta H₂O
 - 11 146 PMT (\varnothing 51 cm)
- Külső detektor
 - Vétó átfutó e, μ , n, γ
 - 2 m vastag H₂O
 - 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 ± 0.004 (stat) + 0.014 - 0.013 (sziszt)
- SSM: Solar Standard Model

LÉGKÖRI NEUTRÍNÓK ($E < 1$ GeV)

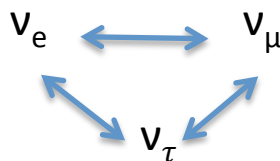
- $[N(\nu_\mu)/N(\nu_e)]_{\text{adat}} / [N(\nu_\mu)/N(\nu_e)]_{\text{MC}} =$
 0.658 ± 0.016 (stat) ± 0.035 (sziszt)
- Kevesebb ν_μ mint vártuk (“ ν_μ eltűnés”)

A Nap, ahogy a neutrínók látják
A napneutrínók rekonstruált forrása

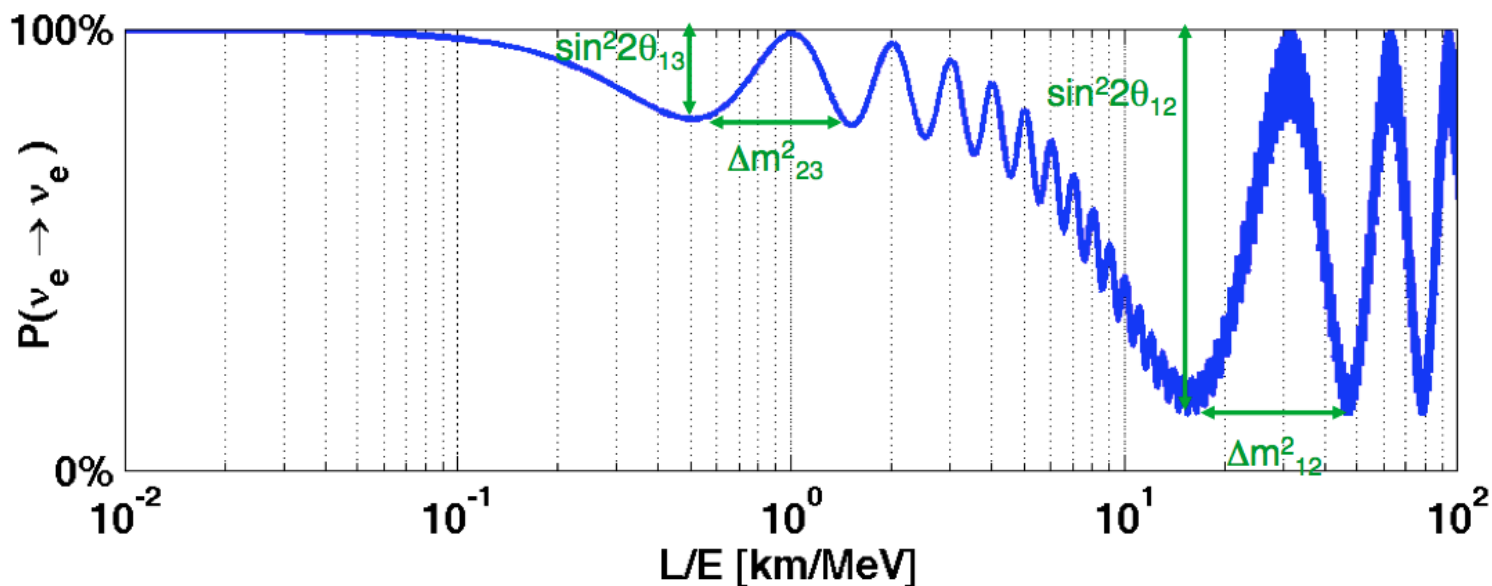


NEUTRÍNÓ KEVEREDÉS

- Az elméleti jóslatoktól való eltérés a nap és légköri neutrínók észlelt számában megmagyarázható, ha feltesszük, hogy a neutrínó fajták átalakulhatnak egymásba:



- Ebben az esetben a valószínűség, hogy egy neutrínó megtartja a fajtáját függ a megtett távolságtól:



NEUTRÍNÓ KEVEREDÉS

- A gyenge kölcsönhatás keveri a neutrínó állapotokat:

gyenge k.h.
állapotok

tömeg-állapotok
(m_1, m_2, m_3)

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\alpha/2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\beta/2} \end{pmatrix}$$

3 szög keveri a 3 állapotot

fázisok

$$\theta_{23} \approx 45^\circ$$

“légköri”

SNO, Super-K,

MINOS, K2K, T2K

MiniBoone, OPERA...

$$\theta_{13} \approx 9^\circ$$

“reaktor”

(Daya bay, RENO)

Chooz, T2K

$$\theta_{12} \approx 32^\circ$$

“nap”

SNO, Super-K,

Borexino, KamLAND...

“double- β ”

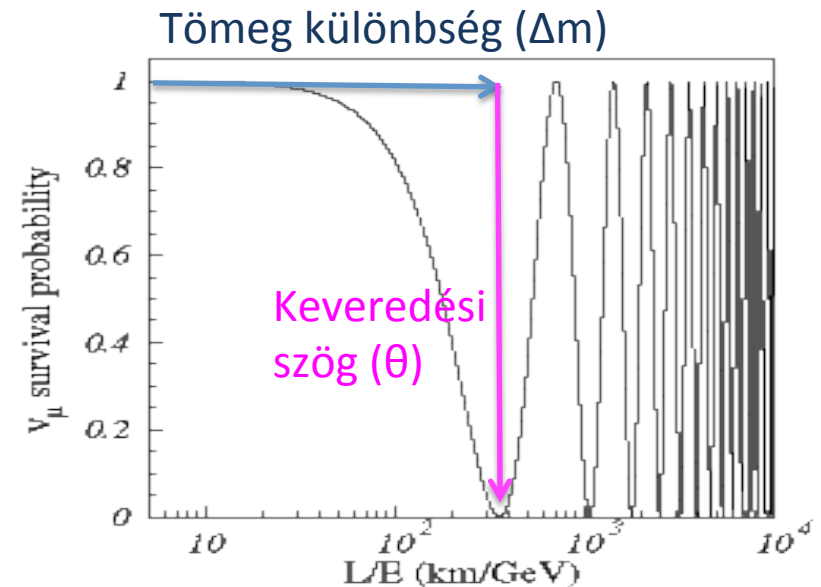
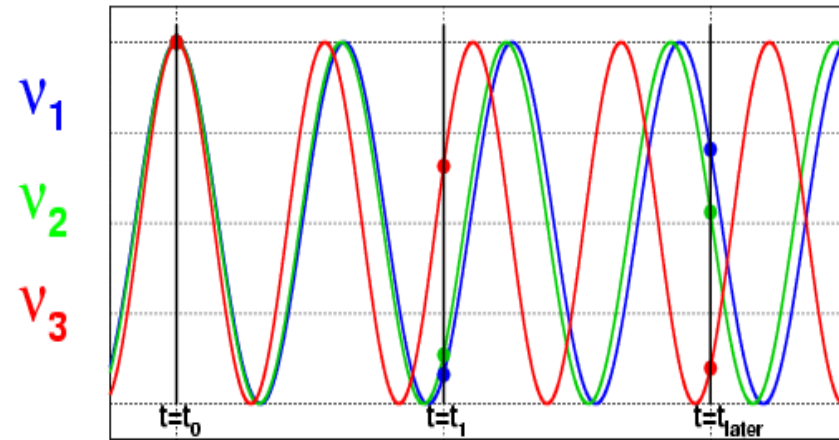
NEUTRÍNÓ KEVEREDÉS

- Különböző tömegállapotok különböző sebességgel terjednek, így elcsúszik a fázisuk az út során
- A megfelelő gyenge k.h. sajátállapot valószínűsége változik
- Túlélési valószínűség:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \sim$$

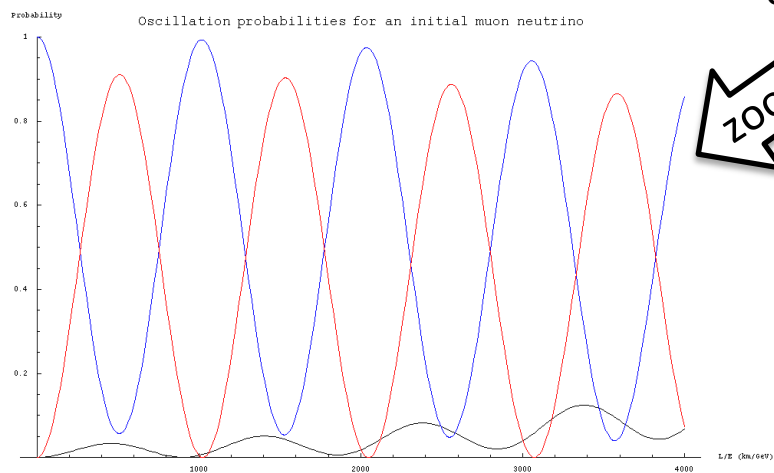
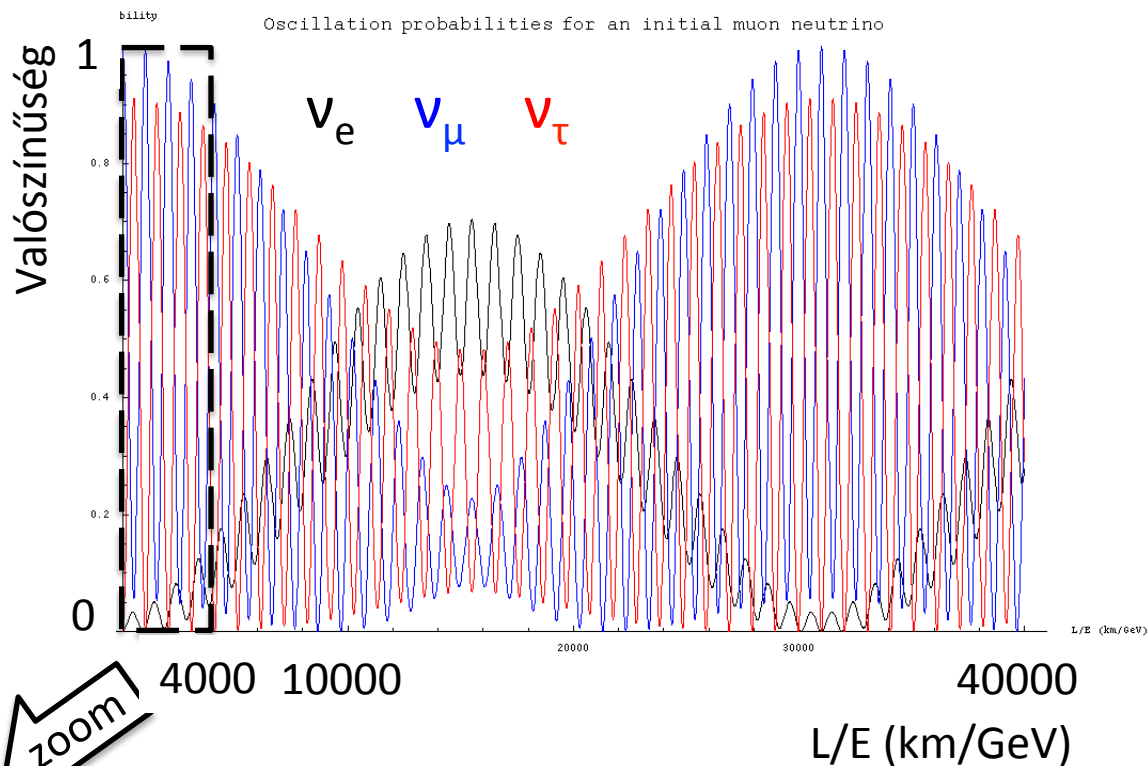
$$1 - \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2(1.27 \Delta m_{23}^2 L/E)$$

megettett távolság



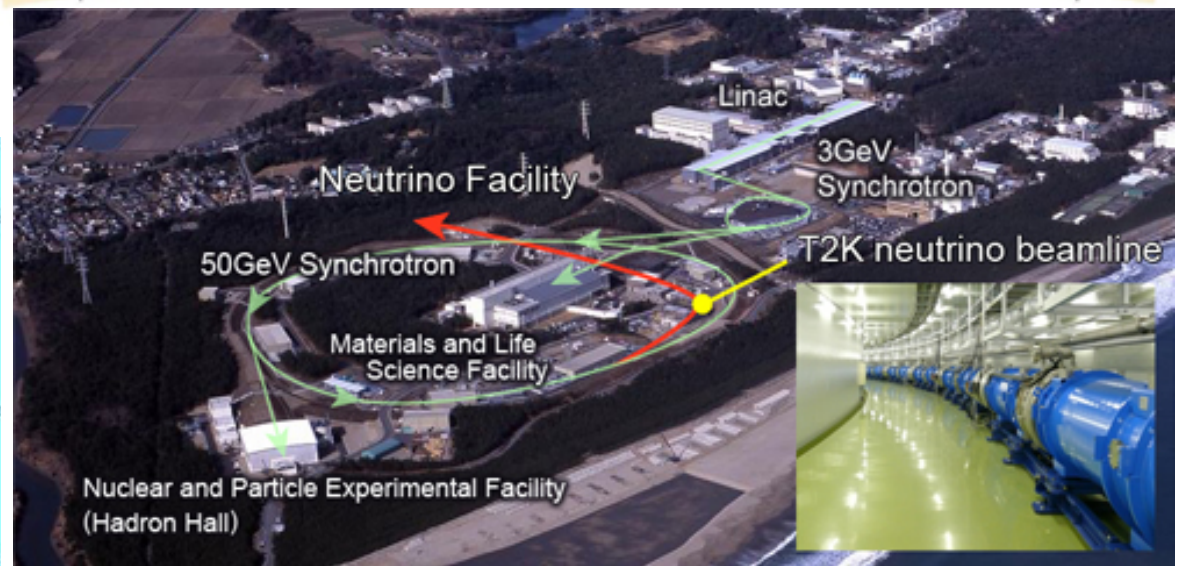
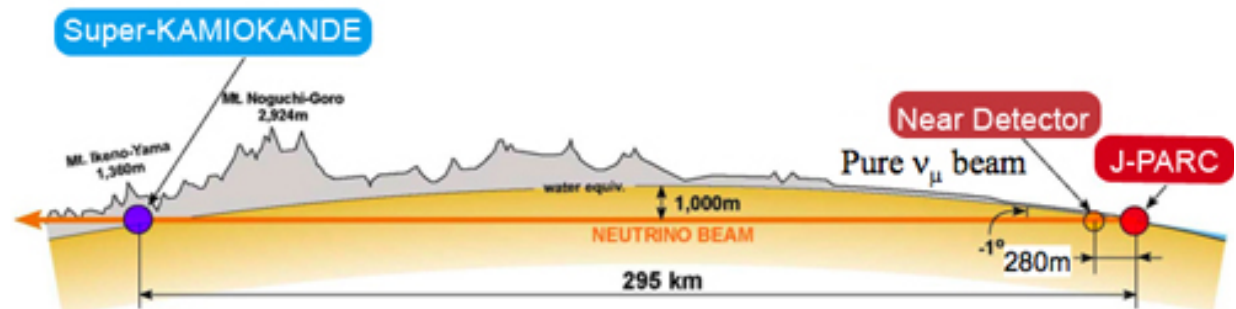
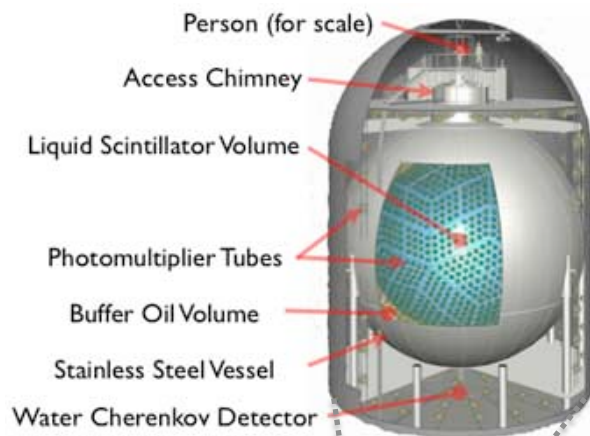
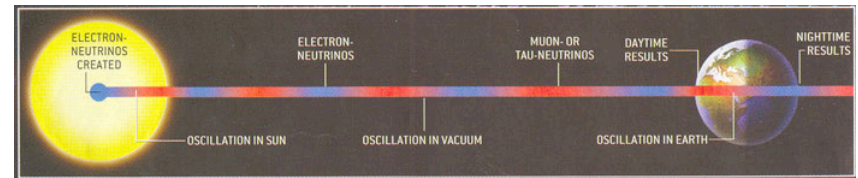
ÉGY MUON NEUTRÍNÓ ÉLETE

- Kezdetben: ν_μ
- L távolság megtétele után minek észlelhetünk egy E energiájú neutrínót?



NEUTRÍNÓ KÍSÉRLETEK: BASELINE (ALAPTÁVOLSÁG)

- Léggöri neutrínó kísérletek: $L = \text{Föld átmérője}$
- Nap neutrínó kísérletek: $L = \text{Föld} - \text{Nap távolság}$
- Gyorsító vagy reaktor kísérletek
 - T2K (Tokai-to-Kamioka kísérlet, Japán): 295 km távolság (JPARC neutrínó nyaláb – Super Kamiokande detektor)
 - KamLand: 53 reaktor, 180 km átlagos távolságra

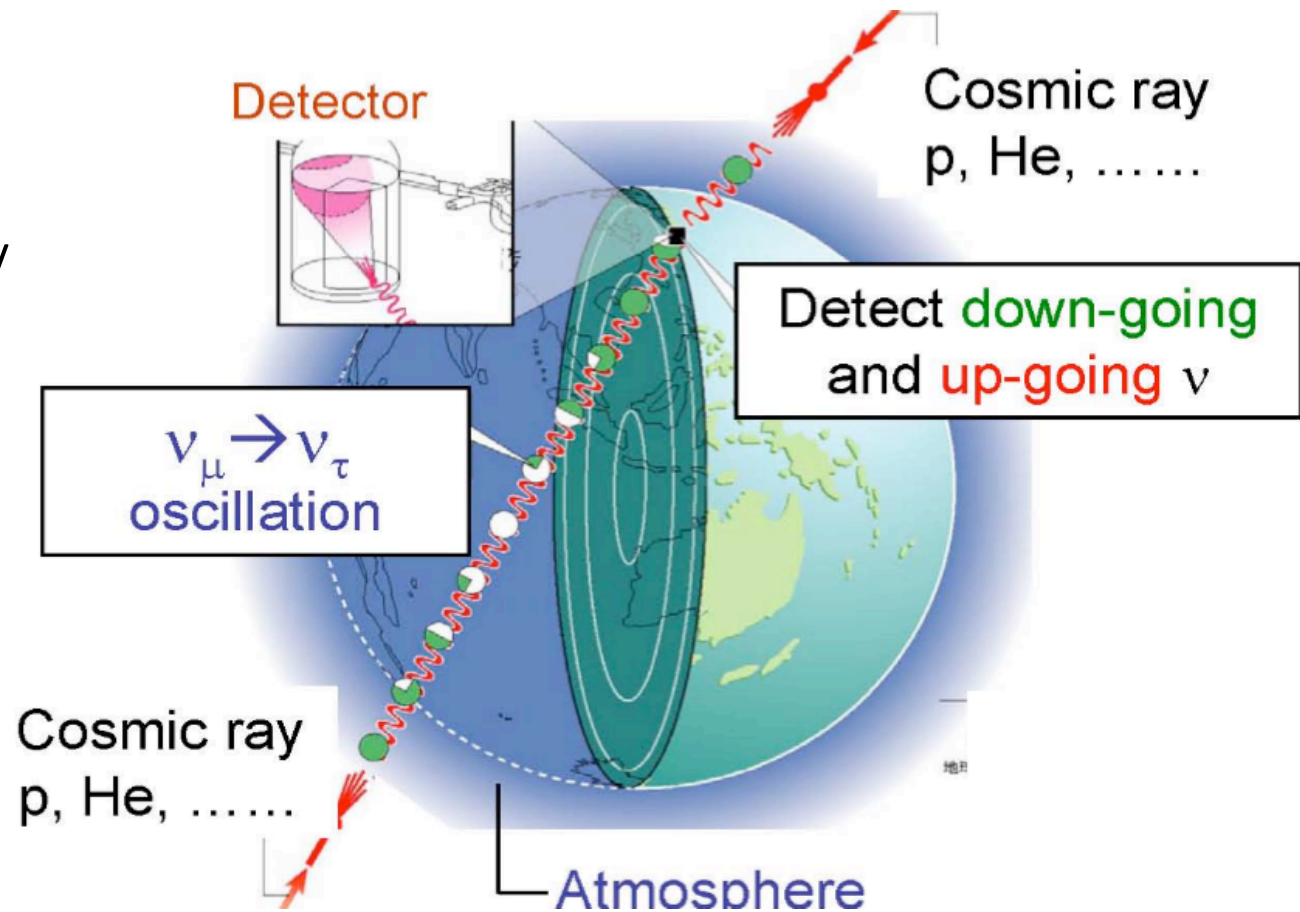


NEUTRÍNÓ OSZCILLÁCIÓ MÉRÉSE: SKK-I

ν_μ eltűnés mérése a Föld átmérőjén keresztül

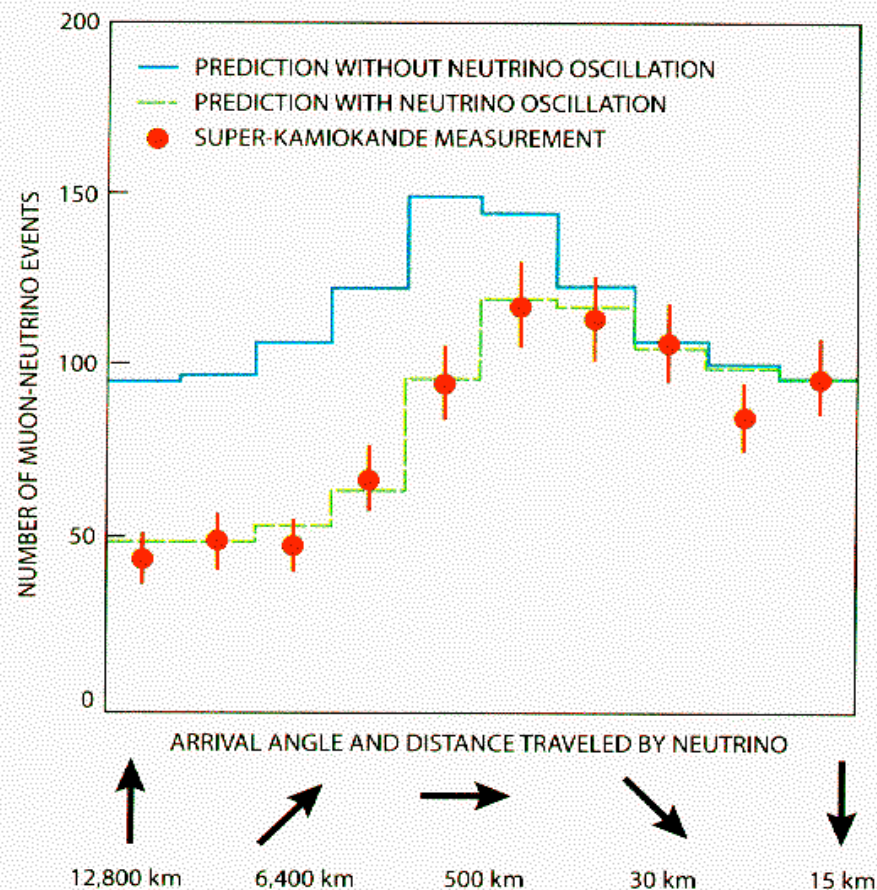
$$\text{Fluxus}^\uparrow / \text{Fluxus}^\downarrow = \frac{N(-1 < \cos\theta < -0.2)}{N(0.2 < \cos\theta < 1)} = 0.54 \pm 0.04$$

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



NEUTRÍNÓ OSZCILLÁCIÓ MÉRÉSE: SKK-I

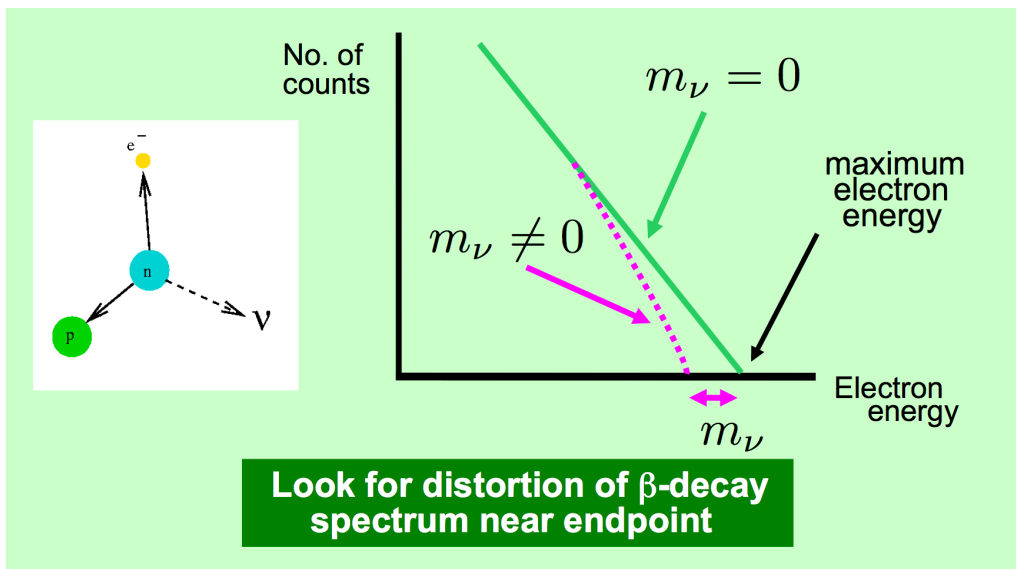
- Fentről érkező ν_e , ν_μ megvan
- Lentről érkező ν_μ elfogy
- Oszcilláció a föld átmérőjében
- M. Koshiba, Nobel díj 2002



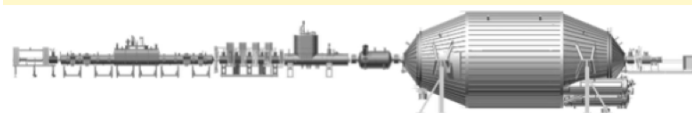
NUMBER OF HIGH-ENERGY MUON-NEUTRINOS seen arriving on different trajectories at Super-K clearly matches a prediction incorporating neutrino oscillations (*green*) and does not match the no-oscillation prediction (*blue*). Upward-going neutrinos (*plotted toward left of graph*) have traveled far enough for half of them to change flavor and escape detection.

LAURIE GRACE

TÖMEG SAJÁTÁLLAPOTOK



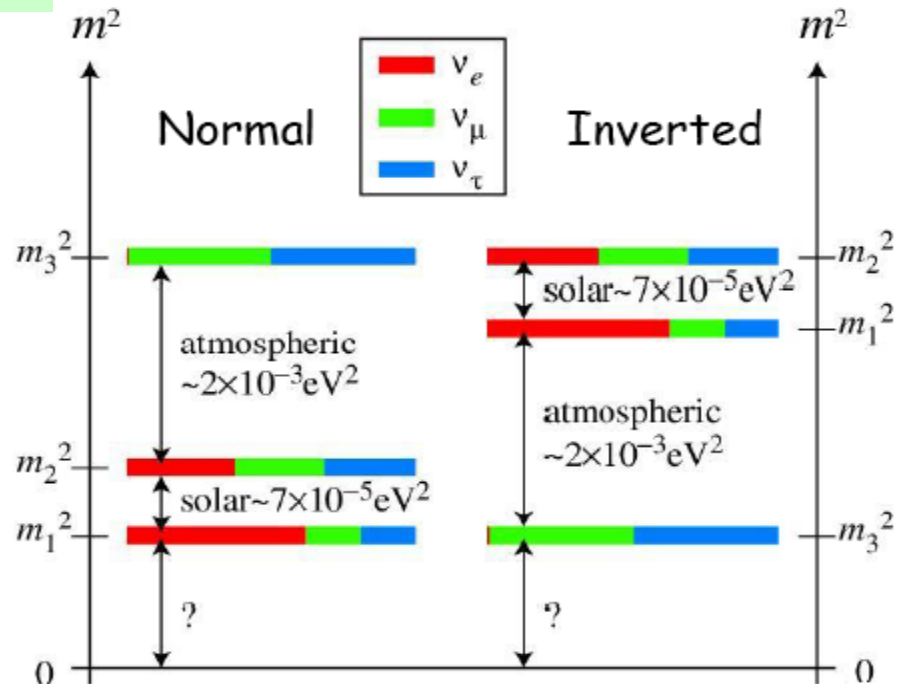
Tritium spectrometer: KATRIN ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$
18.6 keV endpoint



Sensitivity to ~ 0.2 eV
Data in 2016?

turning on soon

- β -bomlás vizsgálatából:
 $m_{\min} < 2.2$ eV
- Kozmológiai adatokból:
 $\Sigma m_i \lesssim 0.6$ eV
- Neutrínó oszcillációból Δm^2
- Normal ($m_1 < m_2 < m_3$)
vagy fordított ($m_3 < m_1 < m_2$)
hierarchia?





WHAT ARE THE MASSES
OF THE THREE KNOWN
NEUTRINO TYPES?



ARE NEUTRINOS
THEIR OWN
ANTIPARTICLES?

BIG

QUESTIONS



ARE THERE MORE
THAN THREE
NEUTRINO FLAVORS?



DOES THE HIGGS
GIVE MASS
TO NEUTRINOS?



WHY DID MATTER
WIN OVER
ANTIMATTER?

4. RÉSZ

A Standard Modellen túl:
szuperszimmetria és extra dimenziók

A STANDARD MODELEN TÚL

A Standard Modell immár teljes a Higgs-bozonnal és még mindig kitűnően működik
 Sok nyitott kérdés azonban túl mutat rajta és egy alapvetőbb elméletet igényel!

Neutrínó tömegek?

Sötét anyag?
Sötét energia?

Higgs tömeg stabilizálása?

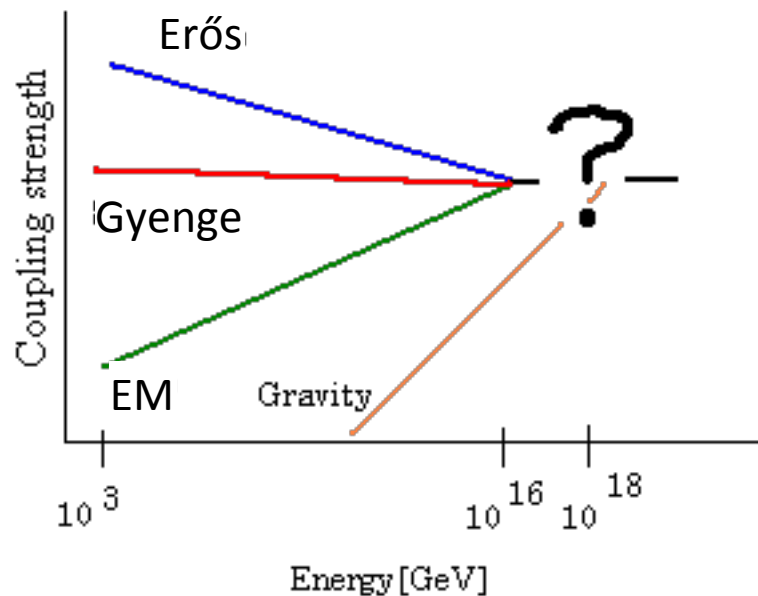
Anyag – antianyag aszimmetria?

Csatolás egyesítés?

Gravitáció + mértékkölcsönhatások?

A KÖLCSÖNHATÁSOK EGYESÍTETT ELMÉLETE

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



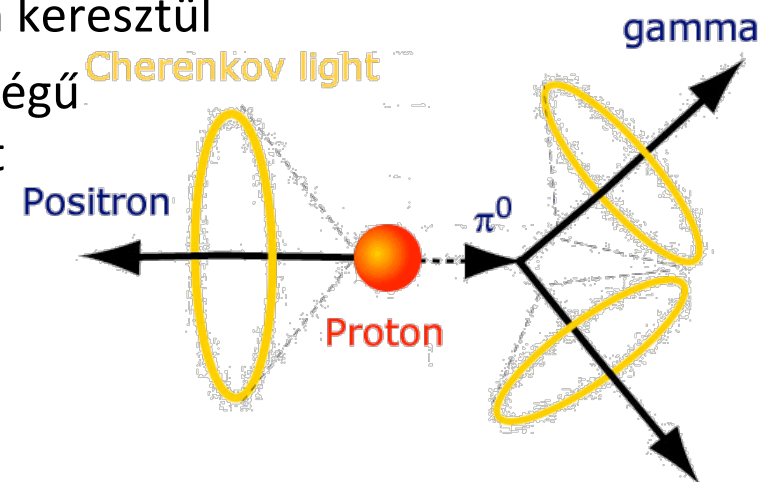
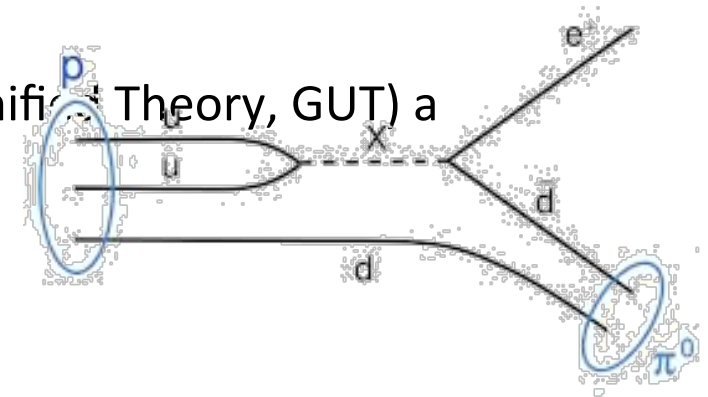
- Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás magas energiákon közös elméletbe foglalható → elektro-gyenge elmélet
- Igéretes ötletek vannak az elektro-gyenge és erős kölcsönhatások nagy egyesítésére is
- **Megvalósul a nagy egyesítés?**
- A gravitáció kvantumelmélete azonban koncepcionális változtatást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

PROTON BOMLÁS

Barion szám:

$$B = \frac{1}{3} (n_q - n_{\bar{q}})$$

- Lehetséges radioaktív bomlás, pl. $p \rightarrow \pi^0 e^+ \rightarrow \gamma \gamma e^+$ (B-L megmarad!)
 - Egyéb lehetséges bomlások: $\pi^0 \mu^+$, $K^0 \mu^+$, $K^+ \nu$...
- A proton ($p=[uud]$) a legkönnyebb barion: ha a barion szám (kvark-szám) megmarad, a proton stabil
- Bizonyos Nagy Egyesített Elméletekben (Grand Unified Theory, GUT) a barionszám megmaradás expliciten sérül
 - GUT: elektromgyenge és erős kölcsönhatások egyesítése
 - A proton elbomolhat Higgs bozonon, mágneses monopóluson vagy új X bozonon keresztül
- Ha a proton elbomolhat, nagyon nagy mennyiségű anyagot vizsgálva találhatunk erre bizonyítékot
 - Óriási tömegű detektorok!
- Nincs kísérleti bizonyíték proton bomlásra
- Super-Kamiokande: $\tau_p > 8.2 \cdot 10^{33}$ év



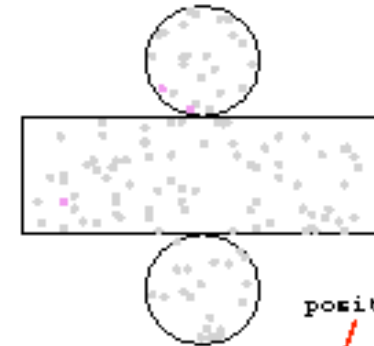
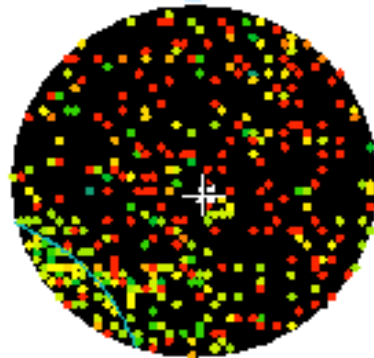
PROTON BOMLÁS KERESÉSE

Super-Kamiokande

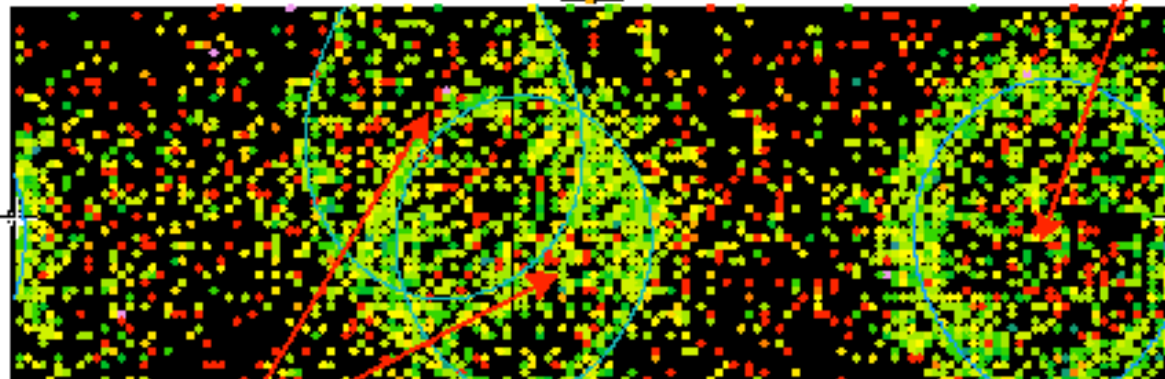
```
Run: 999999 Event: 49
27-08-17,03,25.92
runex: 2711 hmc. 7390 pr
cutex: -1 hmc. 0 pr (in:runex)
trigger: no. 0x02
sp.ver: 0
```

Resid(ns)

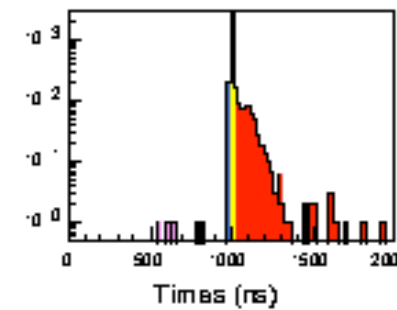
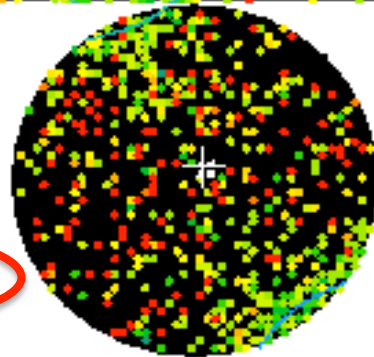
```
■ > 22
■ 20- 22
■ 17- 20
■ 14- 17
■ 11- 14
■ 8- 11
■ 5- 8
■ 2- 5
■ 0- 2
■ -2- 0
■ -5- -2
■ -8- -5
■ -11- -8
■ -14- -11
■ -17- -14
■ < -17
```



positron



Decay gamma π from π^0



Sample $p \rightarrow e^+ \pi^0$ Monte Carlo Event

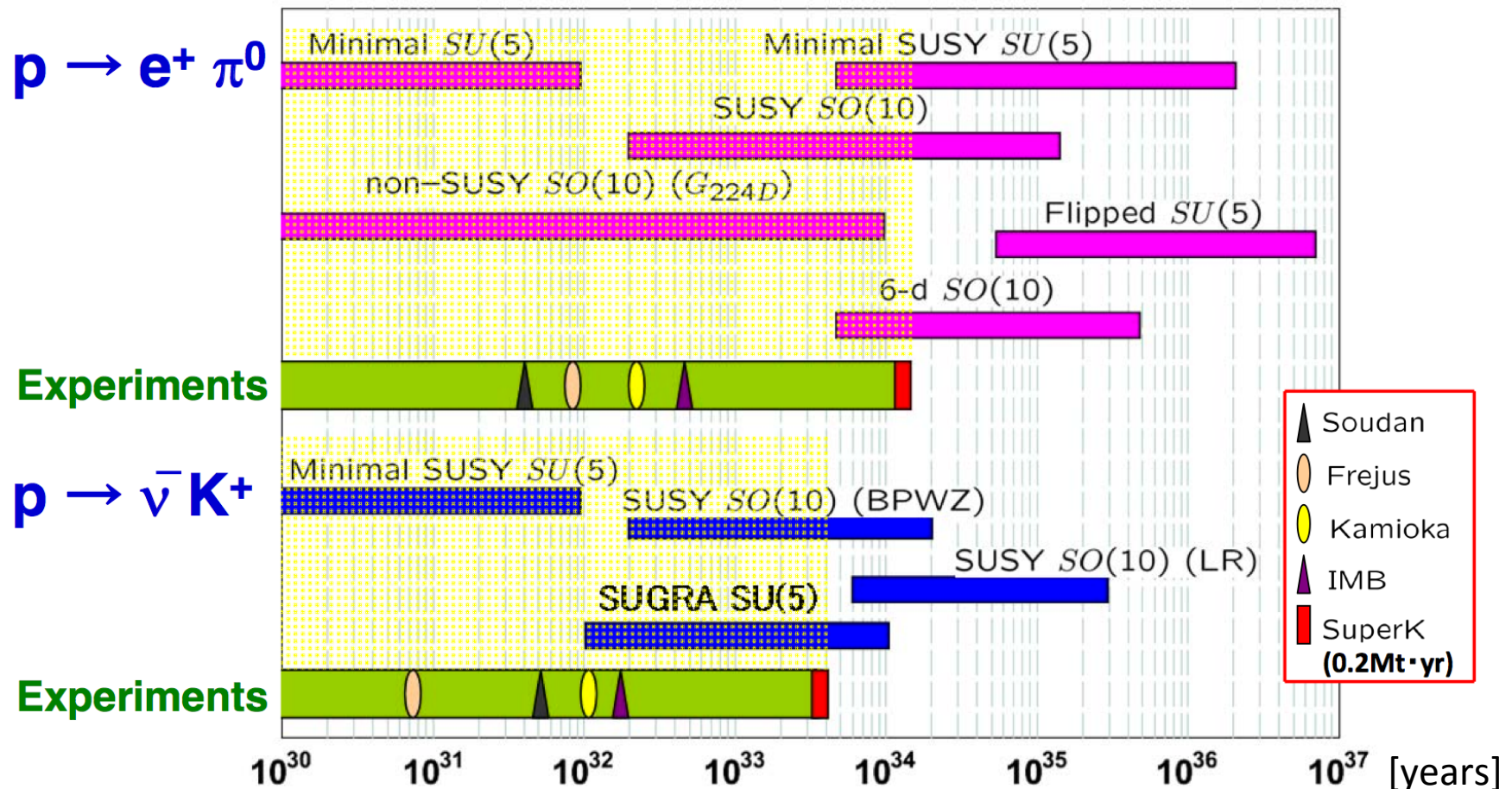
PROTON ÉLETTARTAM GUT MODELLEKBEN

Predicted lifetime of proton for major two decay modes

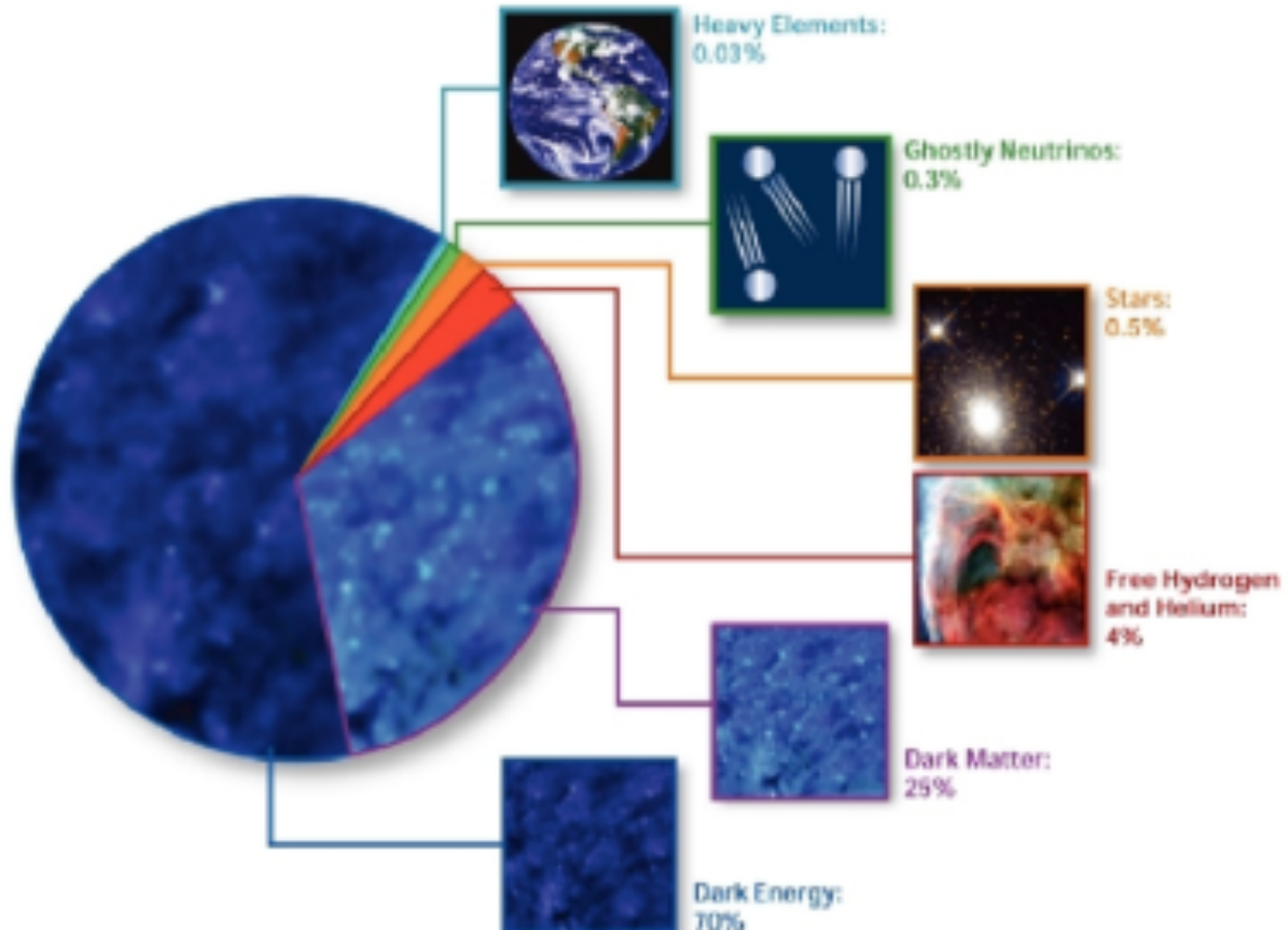


Summary of the current status

comparison with the experimental data

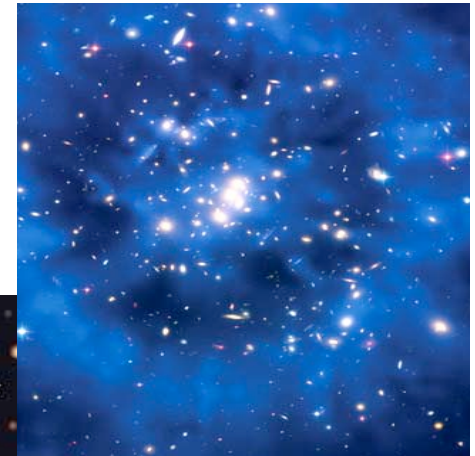


AZ UNIVERZUM ALKOTÓELEMEI

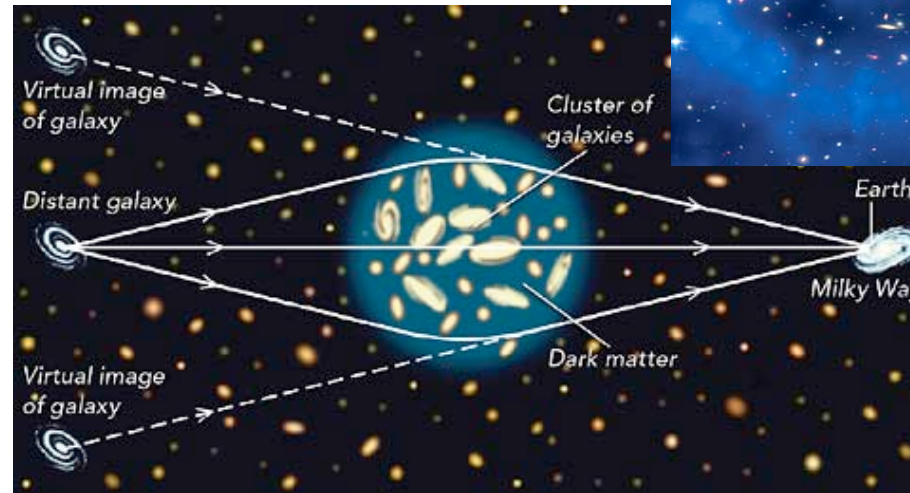




SÖTÉT ANYAG



- Kozmológiai megfigyelések arra mutatnak, hogy csupán az univerzum kis hányadát alkotja a látható anyag
- A sötét anyag létére annak gravitációs hatásából következtetünk (e.g. galaxisok mozgása, fény eltérülése – gravitációs lencse, ..)



- **Mi a sötét anyag?**
 - Forró (relativisztikus) sötét anyag: neutrínók
 - Nem fényes normál anyag: fekete lyukak, neutron csillagok, barna törpék, bolygók... (**MA**ssive **C**ompact **H**alo **O**bjects)
 - *Gyengén kölcsönható nehéz részecskék* (**W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**articles)
 - Axionok?
 - Steril neutrínók?

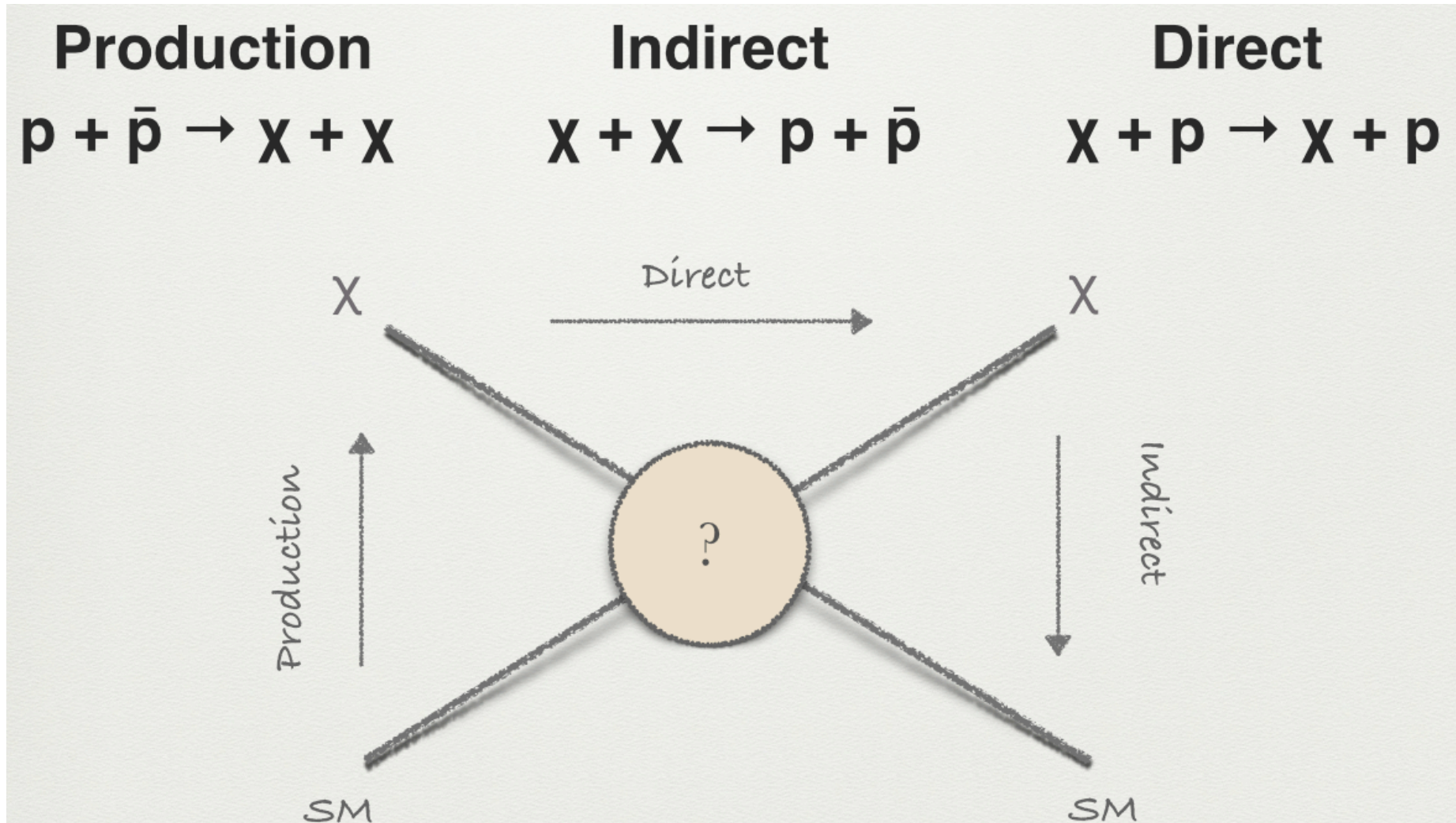
WIMP – csoda

A mai sötét anyag gyakoriság eléréséhez szükséges sötét anyag ön-annihilációs ($\chi\chi \rightarrow X$) hatáskeresztmetszet

$$\sigma_{ann} \simeq 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s} \sim \frac{g_{wk}^4}{4\pi(1 \text{ TeV})^2}$$

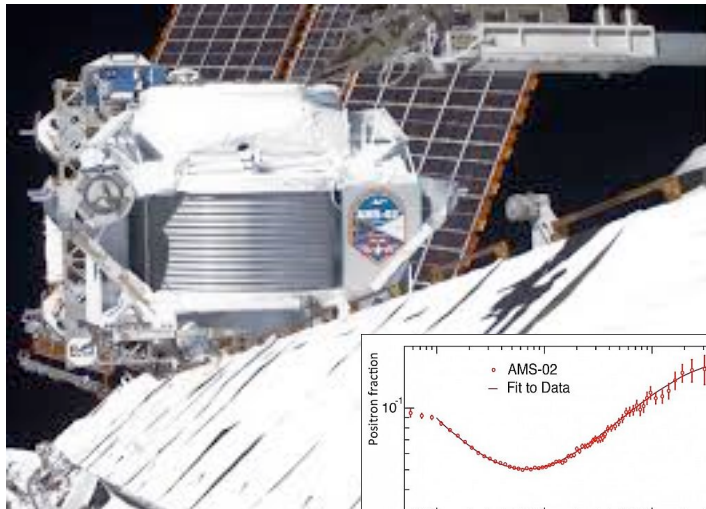
remekül egyezik a gyengén kölcsönható kb. 1 TeV tömegű részecskékre várt értékkel.

SÖTÉT ANYAG ÉSZLELÉSE

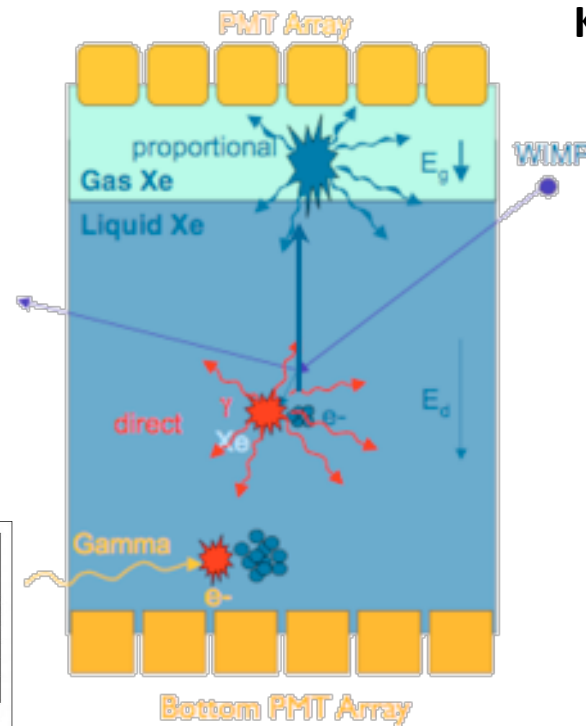


SÖTÉT ANYAG KERESÉSE

- Közvetett észlelés:
Ritka ön-annihilációból származó sugárzás észlelése (Fermi, AMS, ...)
- Közvetlen észlelés:
Sötét anyag ritka kölcsönhatása (földalatti) nagy detektorok anyagával (LUX, XENON? CDMS, EDELWEIS, ZEPLIN, CRESST, DAMA ...)
- Gyorsítós kísérletek (LHC...)



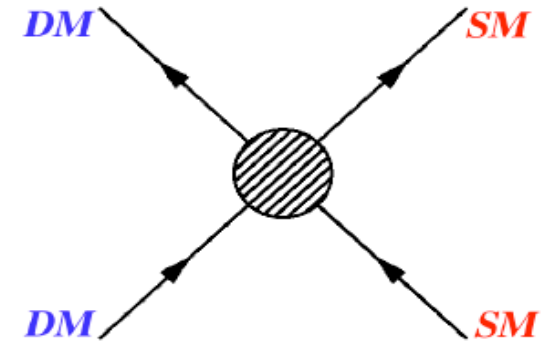
HTP2015



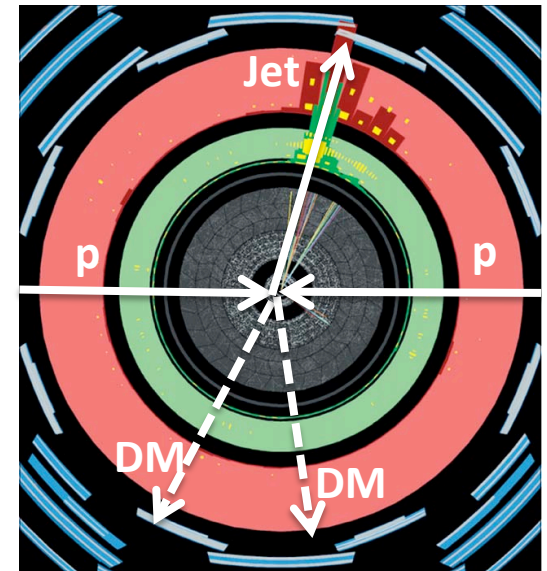
Pásztor: Bevezetés a részecskefizikába

Termikus kifagyás (korai univerzum)
Közvetett észlelés

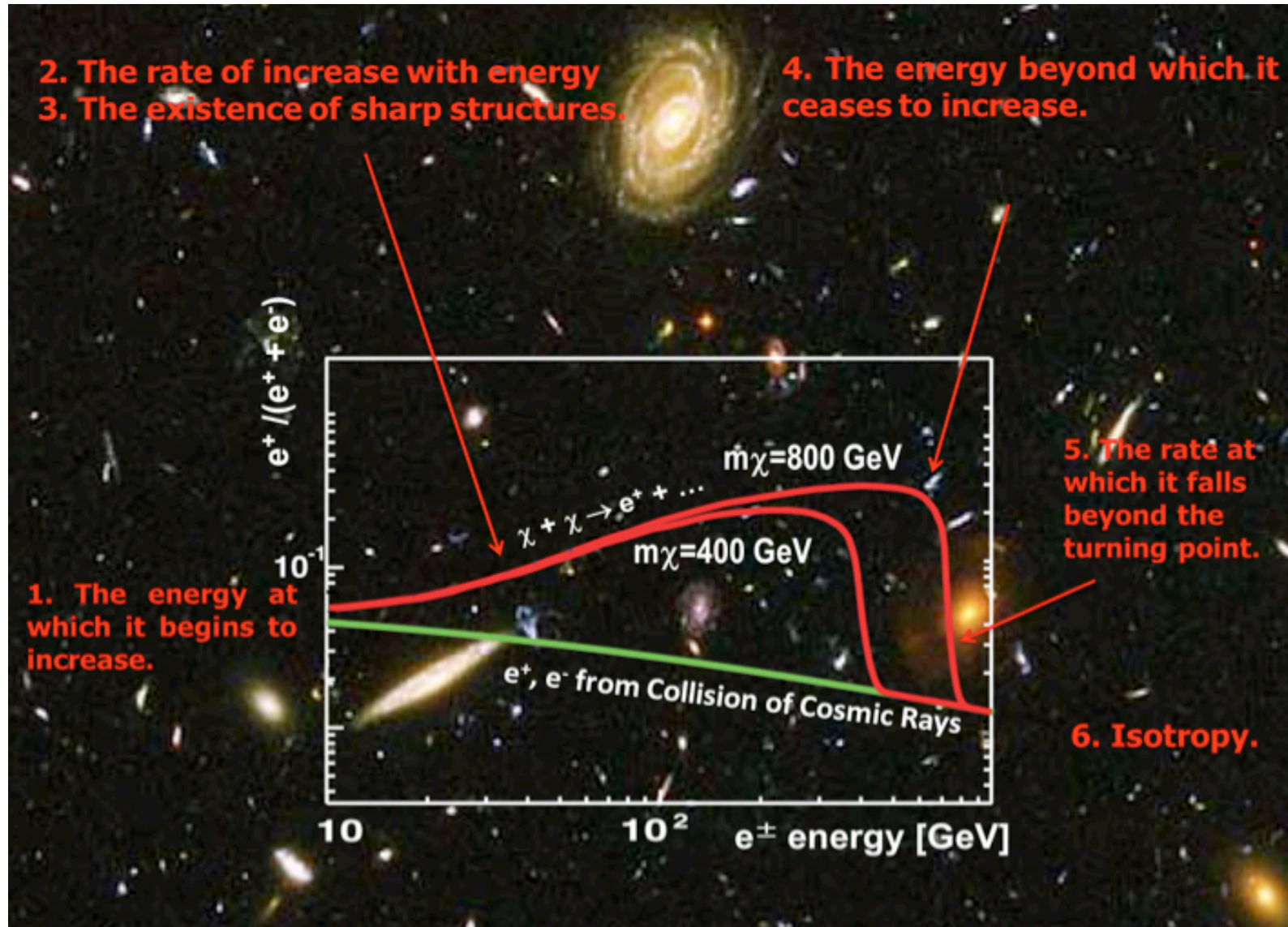
Közvetlen észlelés



Keletkezés gyorsítóknál

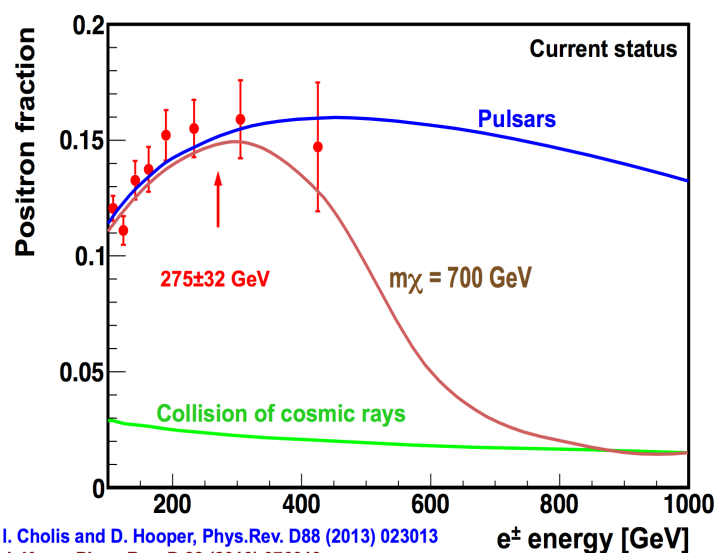


AMS: SÖTÉT ANYAG KERESÉS AZ ŪRBEN

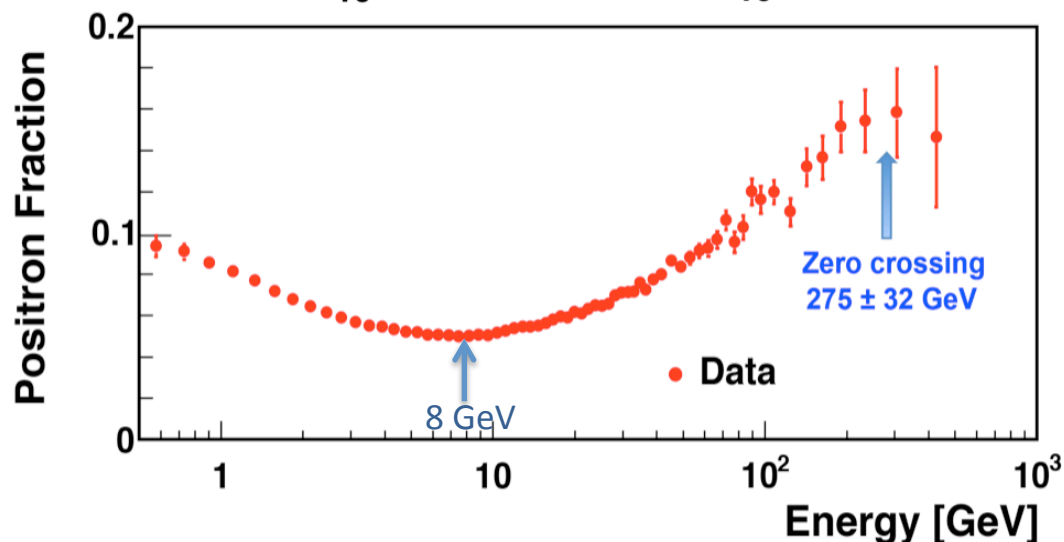
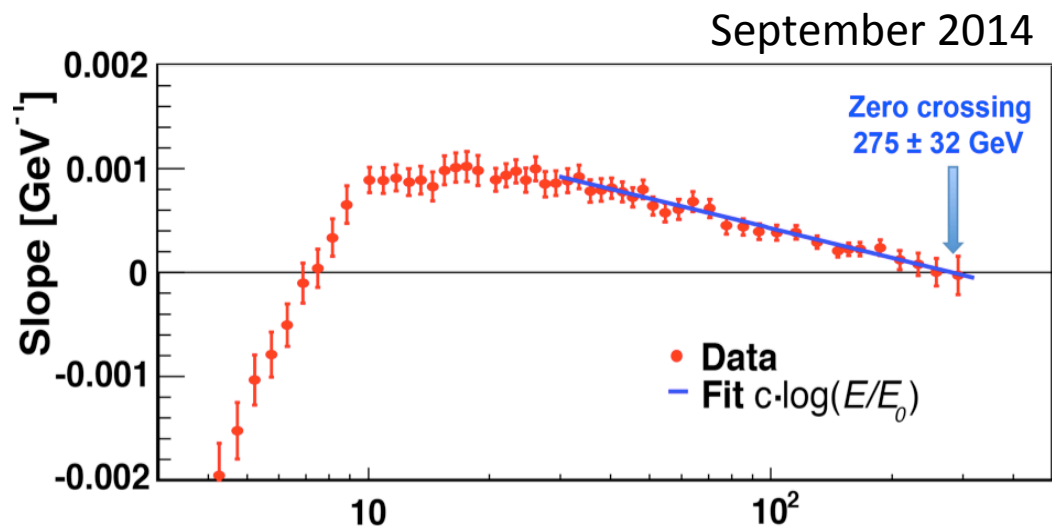


AMS: SÖTÉT ANYAG KERESÉS AZ ŰRBEN

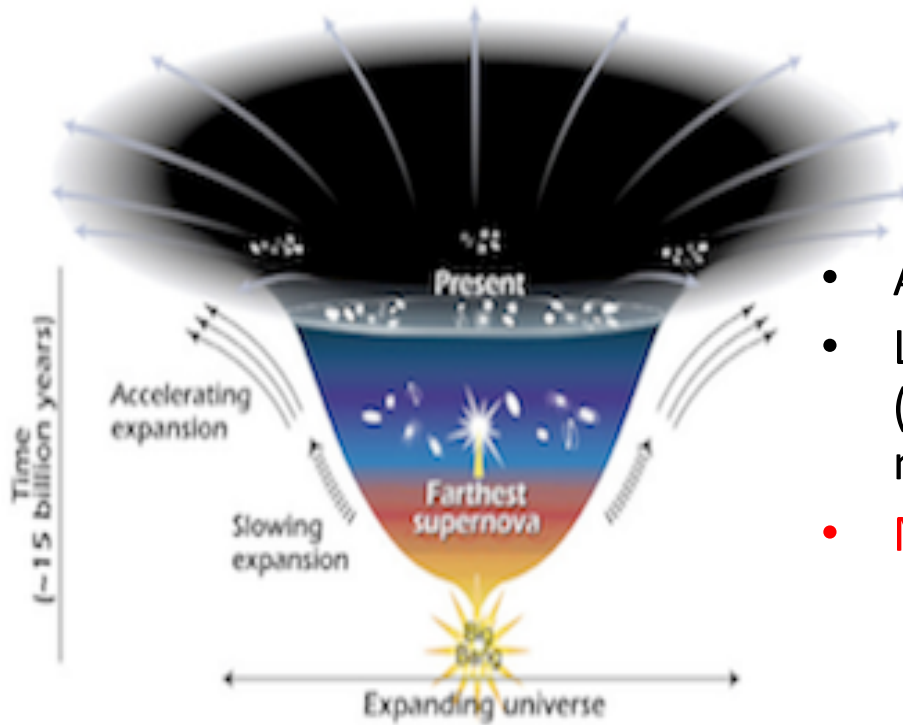
- Egy új jelenség felfedezése?
- Konzisztens $m = 1 \text{ TeV}$ tömegű neutralínó keletkezéssel
 - LHC még nem érte el ezt a tömeget
- **Pozitronok asztrofizikai forrásokból (pl. pulzárokból)?**
- További mérések szükségesek (esés sebessége... , anti-proton hányados)



I. Cholis and D. Hooper, Phys.Rev. D88 (2013) 023013
 J. Kopp, Phys. Rev. D 88 (2013) 076013

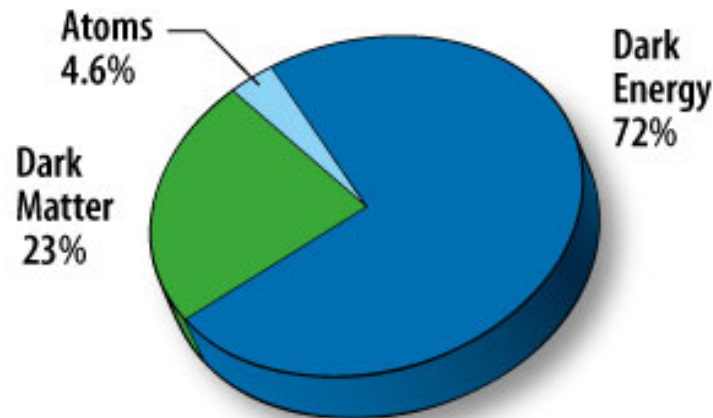


SÖTÉT ENERGIA



NASA, Pixa

Kozmológiai Λ CDM Modell



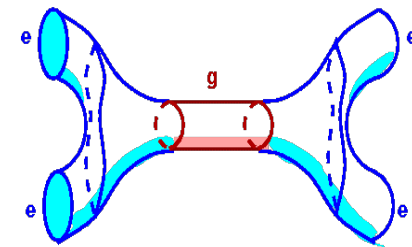
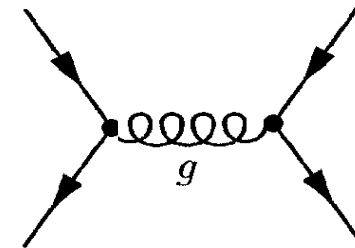
- Az univerzum tágulása gyorsul
- Létezik egy ismeretlen sötét energia (a gravitációval ellentétes hatású taszító erő, negatív nyomás)?
- **Mi a sötét energia?**
 - Einstein-féle kozmológiai konstans: időben és térben állandó vákumenergia (de miért ilyen kicsi az értéke?)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- Kvintesszencia: időben változó skalár tér, egy új 5. kölcsönhatás
- *Alternatívák: Módosított gravitációs törvény? Több dimenzió? Jobb közelítések szükségesek az Einstein-egyenletek megoldásához?*

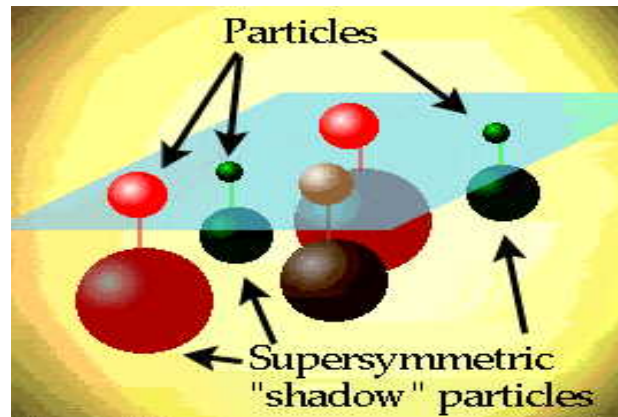
HÚRELMÉLET

- 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 nem alkalmazható a gravitonra, a gravitáció feltételezett spin-2 közvetítő részecskéjére: 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

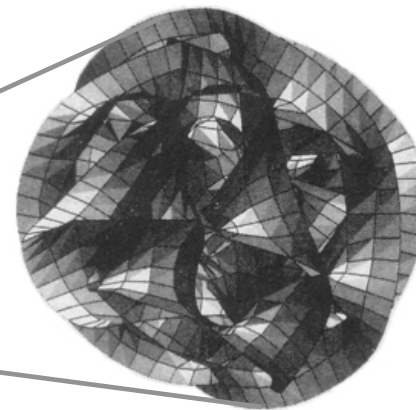
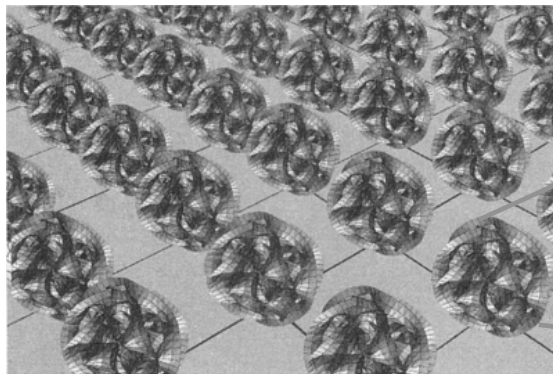


HÚRELMÉLET ?!?!

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



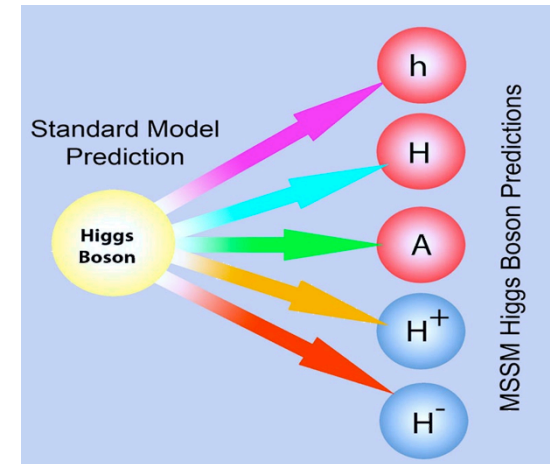
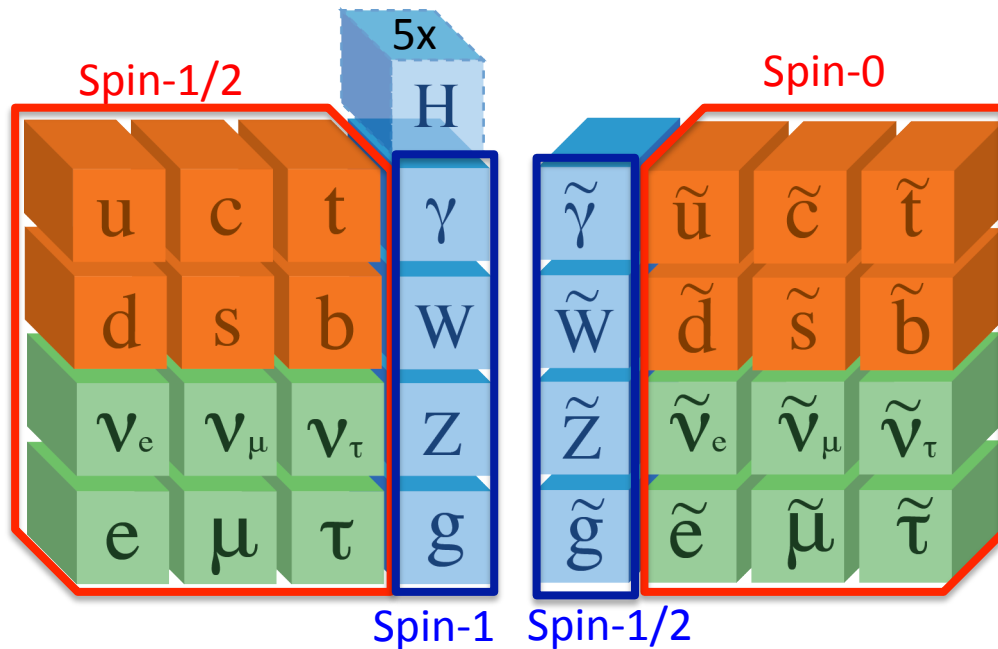
- Extra térbeli dimenziók (11 dimenziós téridő)



További térbeli dimenziók:
6-dimenziós
Calabi-Yau tér

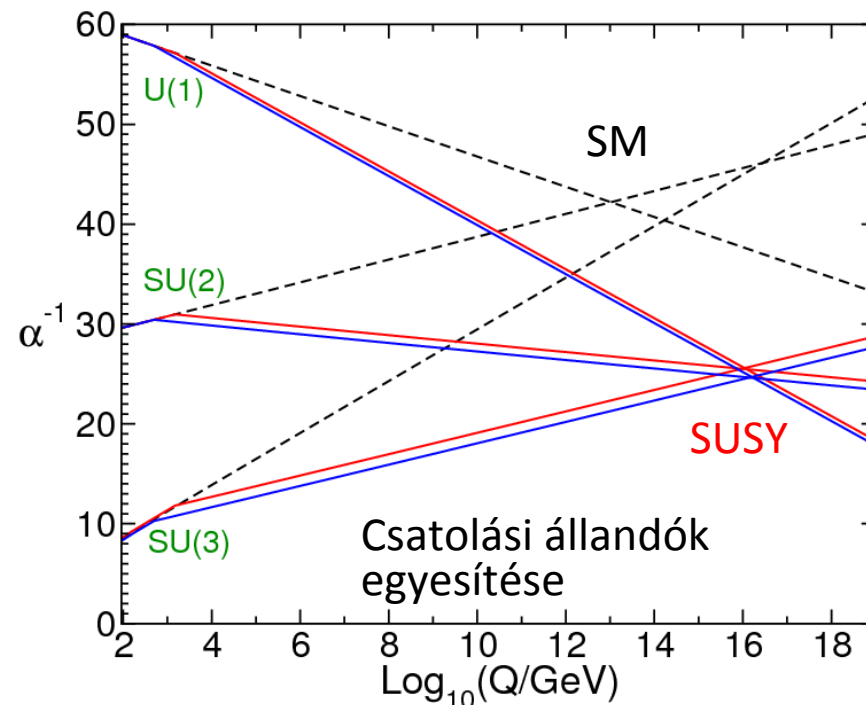
SZUPERSZIMMETRIA (SUSY)

- 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, $X_L, X_R \leftrightarrow \tilde{X}_1, \tilde{X}_2$
- Kiterjesztett Higgs szektor: minimum 5 Higgs-bozon



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, pl. a proton bomlás megakadályozására)
 - Ha az R-paritás megmarad, akkor a legkönnyebb SUSY részecske stabil (sötét anyag)
- 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



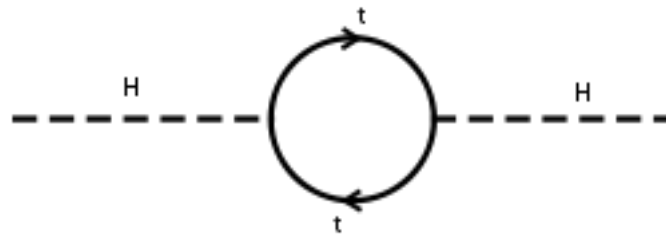
MIBEN SEGÍT A SZUPERSZIMMETRIA?

HIERARCHIA PROBLÉMA

- Óriási különbség az energia skálák között
 - 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.



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

- Hogyan maradhat m_H az elektrogyenge skála környékén?

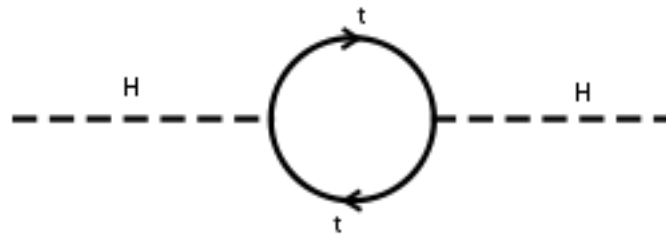
MIBEN SEGÍT A SZUPERSZIMMETRIA?

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.



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

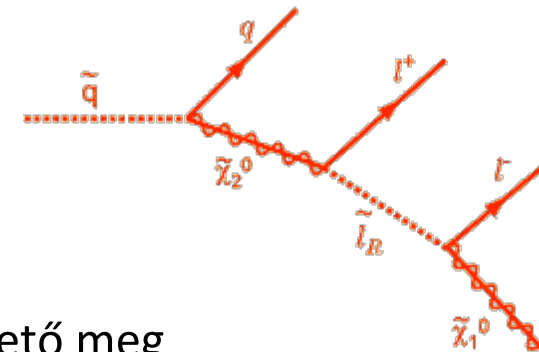


$$\Delta m_H^2 = 2 * \frac{\lambda_S}{16\pi^2} [\Lambda_{UV}^2 + \dots].$$

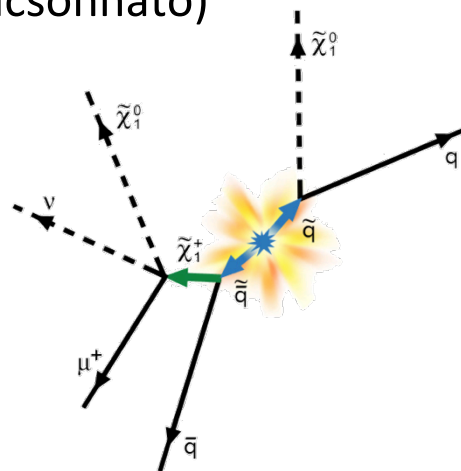
- Hogyan maradhat m_H az elektrogyenge skála környékén?
- A SUSY megvédheti a Higgs tömeget a vákum fluktuációktól egészen a Planck skáláig (minden SM hurok-hozzájáruláshoz tartozik egy ellentétes előjelű szuperszimmetrikus partner hurok), ha a partner részecskék tömege $O(\text{TeV})$

SUSY PARTNER RÉSZECSKÉK KERESÉSE

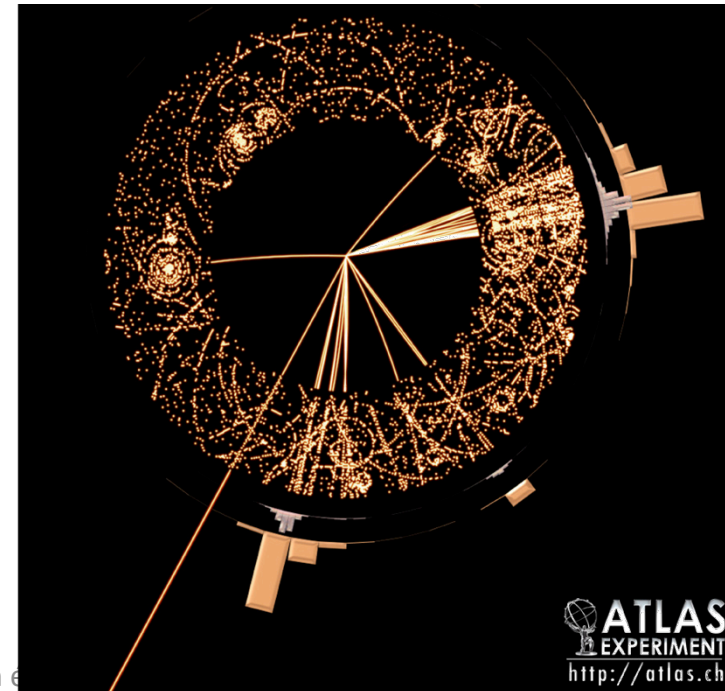
- Nem látunk a SM részecskékkel megegyező tömegű SUSY partnereket → a SUSY, ha jelen van, sérül...
- A SUSY részecskék tömegének $O(\text{TeV})$ körül kell lennie, hogy a modell megtartsa jó tulajdonságait, mint a Higgs tömeg stabilizálását
- Ha így van, az LHC-n észlelhetünk SUSY részecskéket
- Ha az R-paritás megmarad, keletkezés párban
- Bomlás közönséges és SUSY részecskékre (R-paritás!)
- Tulajdonságok modell és paraméter függők
- Általában a legkönnyebb SUSY részecske (LSP) nem figyelhető meg (semleges, gyengén kölcsönható) → hiányzó energia



- Az LSP természetete is a modelltől függ (neutralino, gravitino...)

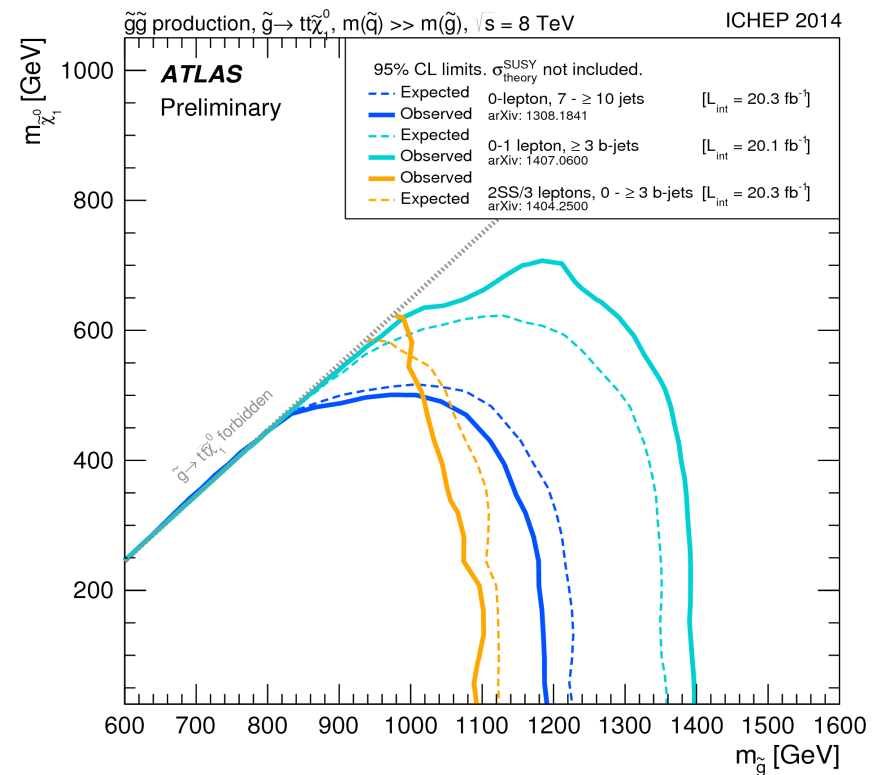
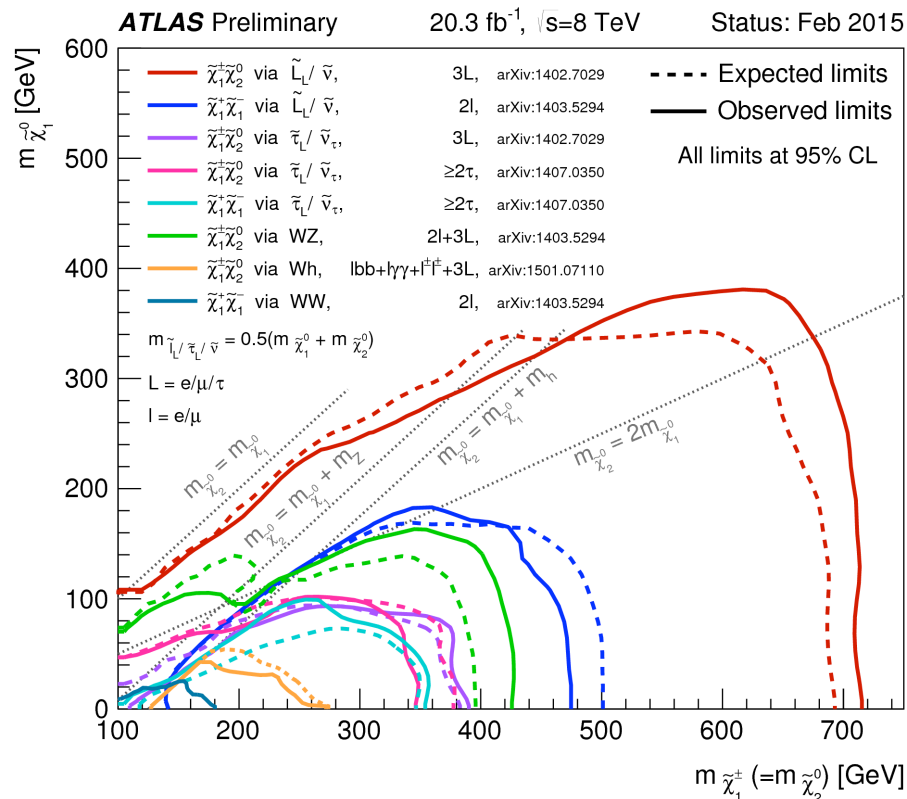


q = quark μ = muon
 \tilde{q} = squark ν = neutrino
 \bar{q} = anti-quark $\tilde{\chi}_1^+$ = chargino
 $\tilde{\bar{q}}$ = anti-squark $\tilde{\chi}_1^0$ = neutralino
 (lightest super-partner)



A SZUPERSZIMMETRIKUS ELMÉLETEK NYITOTT KÉRDÉSEI

- 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: Feb 2015

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

Model	e, μ, τ, γ	Jets	E_T^{miss}	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	Reference		
Inclusive Searches	MSUGRA/CMSSM	0	2-6 jets	Yes	20.3	\tilde{q}, \tilde{g} 1.7 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g})$	1405.7875
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3	\tilde{q} 850 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(1^{\text{st}} \text{ gen. } \tilde{q})=m(2^{\text{nd}} \text{ gen. } \tilde{q})$	1405.7875
	$\tilde{q}\tilde{q}\gamma, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$ (compressed)	1 γ	0-1 jet	Yes	20.3	\tilde{q} 250 GeV	$m(\tilde{q})-m(\tilde{\chi}_1^0) = m(c)$	1411.1559
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 1.33 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1405.7875
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qqW^\pm\tilde{\chi}_1^0$	1 e, μ	3-6 jets	Yes	20	\tilde{g} 1.2 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<300 \text{ GeV}, m(\tilde{\tau}^\pm)=0.5(m(\tilde{\chi}_1^0)+m(\tilde{g}))$	1501.03555
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qq\ell(\ell/\ell\nu/\nu\nu)\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ	0-3 jets	-	20	\tilde{g} 1.32 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1501.03555
	GMSB ($\tilde{\ell}$ NLSP)	1-2 $\tau + 0-1 \ell$	0-2 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 1.6 TeV	$\tan\beta > 20$	1407.0603
	GGM (bino NLSP)	2 γ	-	Yes	20.3	\tilde{g} 1.28 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>50 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2014-001
	GGM (wino NLSP)	1 $e, \mu + \gamma$	-	Yes	4.8	\tilde{g} 619 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>50 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2012-144
	GGM (higgsino-bino NLSP)	γ	1 b	Yes	4.8	\tilde{g} 900 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>220 \text{ GeV}$	1211.1167
GGM (higgsino NLSP)	2 e, μ (Z)	0-3 jets	Yes	5.8	\tilde{g} 690 GeV	$m(\text{NLSP})>200 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2012-152	
Gravitino LSP	0	mono-jet	Yes	20.3	$F^{1/2}$ scale 865 GeV	$m(\tilde{G})>1.8 \times 10^{-4} \text{ eV}, m(\tilde{g})=m(\tilde{q})=1.5 \text{ TeV}$	1502.01518	
3^{rd} gen. \tilde{g} med.	$\tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$	0	3 b	Yes	20.1	\tilde{g} 1.25 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<400 \text{ GeV}$	1407.0600
	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0	7-10 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 1.1 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 350 \text{ GeV}$	1308.1841
	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 e, μ	3 b	Yes	20.1	\tilde{g} 1.34 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<400 \text{ GeV}$	1407.0600
	$\tilde{g} \rightarrow b\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 e, μ	3 b	Yes	20.1	\tilde{g} 1.3 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<300 \text{ GeV}$	1407.0600
3^{rd} gen. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	2 b	Yes	20.1	\tilde{b}_1 100-620 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<90 \text{ GeV}$	1308.2631
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{b}_1 275-440 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=2 m(\tilde{\chi}_1^0)$	1404.2500
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	1-2 e, μ	1-2 b	Yes	4.7	\tilde{t}_1 110-167 GeV 230-460 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 2m(\tilde{\chi}_1^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=55 \text{ GeV}$	1209.2102, 1407.0583
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$ or $t\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ	0-2 jets	Yes	20.3	\tilde{t}_1 90-191 GeV 215-530 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$	1403.4853, 1412.4742
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	0-1 e, μ	1-2 b	Yes	20	\tilde{t}_1 210-640 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$	1407.0583, 1406.1122
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	mono-jet/ c -tag	Yes	20.3	\tilde{t}_1 90-240 GeV	$m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0)<85 \text{ GeV}$	1407.0608
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)	2 e, μ (Z)	1 b	Yes	20.3	\tilde{t}_1 150-580 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>150 \text{ GeV}$	1403.5222
$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z$	3 e, μ (Z)	1 b	Yes	20.3	\tilde{t}_2 290-600 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<200 \text{ GeV}$	1403.5222	
EW direct	$\tilde{\ell}_{L,R}\tilde{\ell}_{L,R}, \tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\ell}$ 90-325 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \ell\nu(\ell\bar{\nu})$	2 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 140-465 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\ell}, \bar{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\tau}\nu(\tau\bar{\nu})$	2 τ	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 100-350 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\tau}, \bar{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1407.0350
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}_L\nu\tilde{\ell}_L(\ell\bar{\nu}), \ell\bar{\nu}\tilde{\ell}_L(\ell\bar{\nu}\nu)$	3 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$ 700 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \bar{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 Z\tilde{\chi}_1^0$	2-3 e, μ	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$ 420 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{ sleptons decoupled}$	1403.5294, 1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 h\tilde{\chi}_1^0, h \rightarrow b\tilde{b}/WW/\tau\tau/\gamma\gamma$	e, μ, γ	0-2 b	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$ 250 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{ sleptons decoupled}$	1501.0710
	$\tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}_R\ell$	4 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_2^0$ 620 GeV	$m(\tilde{\chi}_2^0)=m(\tilde{\chi}_3^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \bar{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_2^0)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1405.5086
Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^\pm$	Disapp. trk	1 jet	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 270 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)-m(\tilde{\chi}_1^0)=160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^\pm)=0.2 \text{ ns}$	1310.3675
	Stable, stopped \tilde{g} R-hadron	0	1-5 jets	Yes	27.9	\tilde{g} 832 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}, 10 \mu\text{s} < \tau(\tilde{g}) < 1000 \text{ s}$	1310.6584
	Stable \tilde{g} R-hadron	trk	-	-	19.1	\tilde{g} 1.27 TeV	-	1411.6795
	GMSB, stable $\tilde{\tau}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\tau}(\tilde{e}, \tilde{\mu}) + \tau(e, \mu)$	1-2 μ	-	-	19.1	$\tilde{\chi}_1^0$ 537 GeV	$10 < \tan\beta < 50$	1411.6795
	GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$, long-lived $\tilde{\chi}_1^0$	2 γ	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$ 435 GeV	$2 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 3 \text{ ns}, \text{ SPS8 model}$	1409.5542
$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow q\mu$ (RPV)	1 μ , displ. vtx	-	-	20.3	\tilde{q} 1.0 TeV	$1.5 < c\tau < 156 \text{ mm}, \text{ BR}(\mu)=1, m(\tilde{\chi}_1^0)=108 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2013-092	
RPV	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e + \mu$	2 e, μ	-	-	4.6	$\tilde{\nu}_\tau$ 1.61 TeV	$\lambda_{311}^\nu=0.10, \lambda_{132}^\nu=0.05$	1212.1272
	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e(\mu) + \tau$	1 $e, \mu + \tau$	-	-	4.6	$\tilde{\nu}_\tau$ 1.1 TeV	$\lambda_{311}^\nu=0.10, \lambda_{1(2)33}^\nu=0.05$	1212.1272
	Bilinear RPV CMSSM	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{q}, \tilde{g} 1.35 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g}), c\tau_{LSP} < 1 \text{ mm}$	1404.2500
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow ee\tilde{\nu}_\mu, e\mu\tilde{\nu}_e$	4 e, μ	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 750 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^\pm), \lambda_{121} \neq 0$	1405.5086
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tau\tau\tilde{\nu}_e, e\tau\tilde{\nu}_\tau$	3 $e, \mu + \tau$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 450 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^\pm), \lambda_{133} \neq 0$	1405.5086
	$\tilde{g} \rightarrow qq\tilde{q}$	0	6-7 jets	-	20.3	\tilde{g} 916 GeV	$\text{BR}(t)=\text{BR}(b)=\text{BR}(c)=0\%$	ATLAS-CONF-2013-091
$\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_1 t, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{s}$	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{g} 850 GeV	-	1404.250	
Other	Scalar charm, $\tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	2 c	Yes	20.3	\tilde{c} 490 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<200 \text{ GeV}$	1501.01325

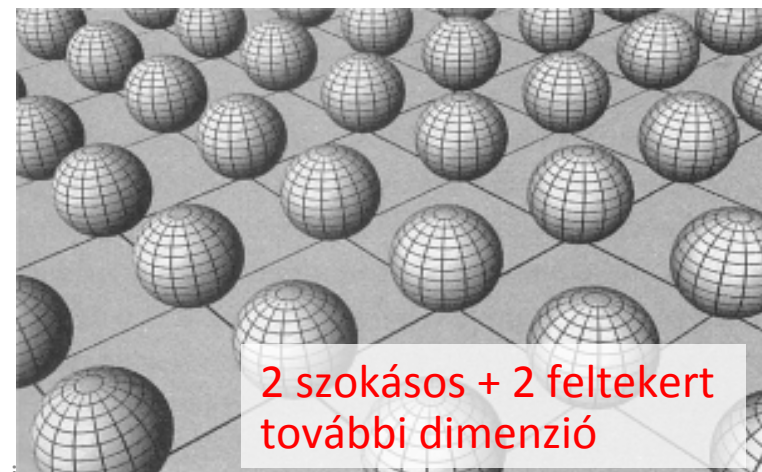
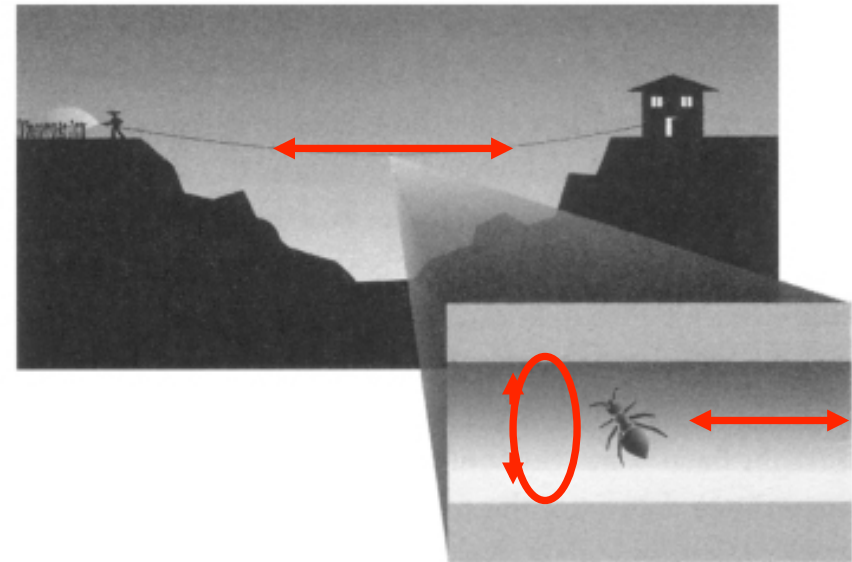
$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ full data $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ partial data $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ full data

10⁻¹ 1 Mass scale [TeV]

*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus 1 σ 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

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



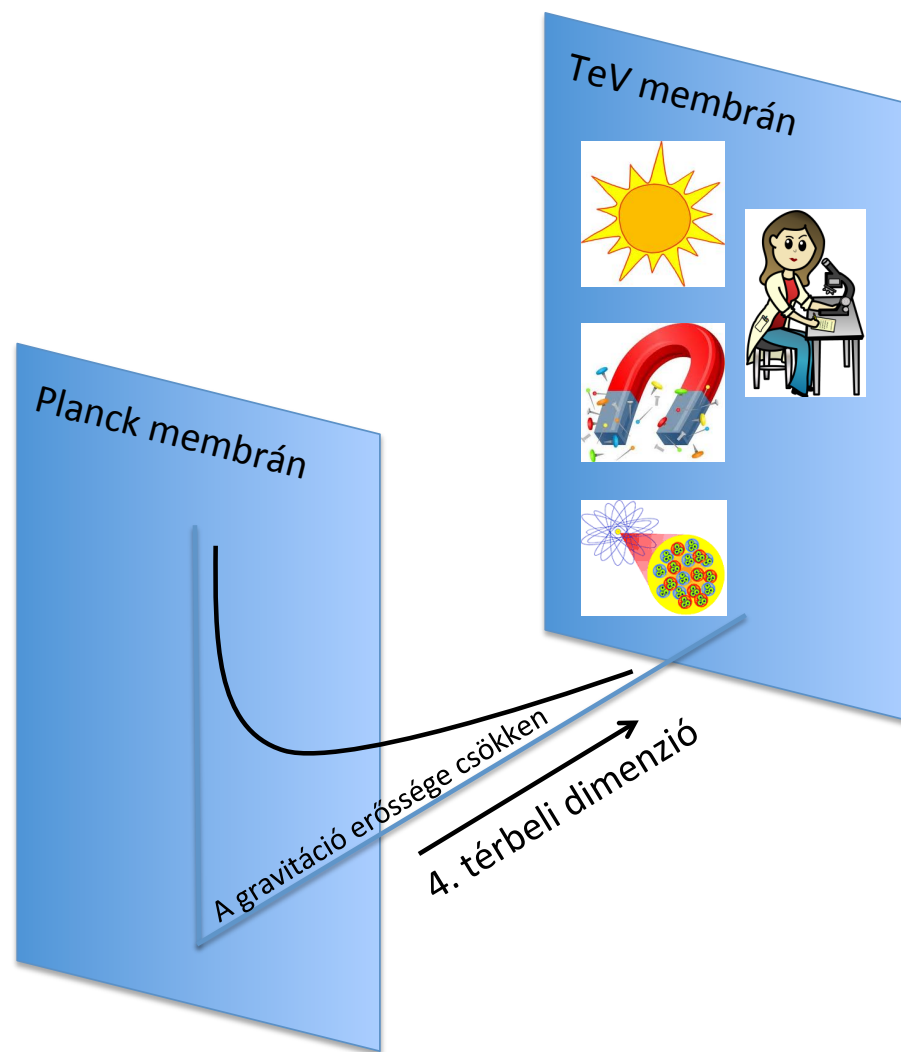
Gravitáció gyenge 3+1 dimenzióban a rejtett térfogat miatt:

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

Gravitációs potenciál módosul $r \ll R$ esetén:

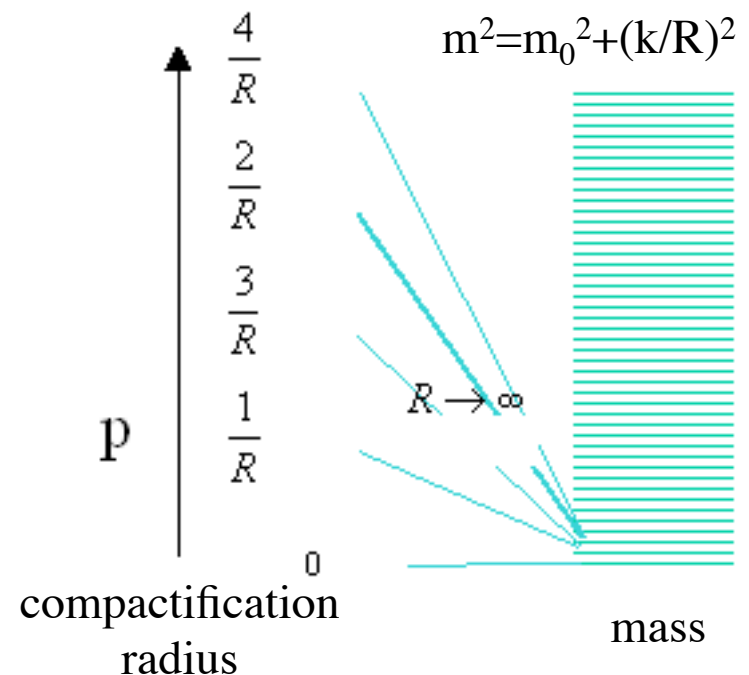
$$V(r) = m_1 m_2 / M_{\text{Planck}[4+n]}^{2+n} r^{1+n}$$

RANDALL-SUNDRUM ED MODELL

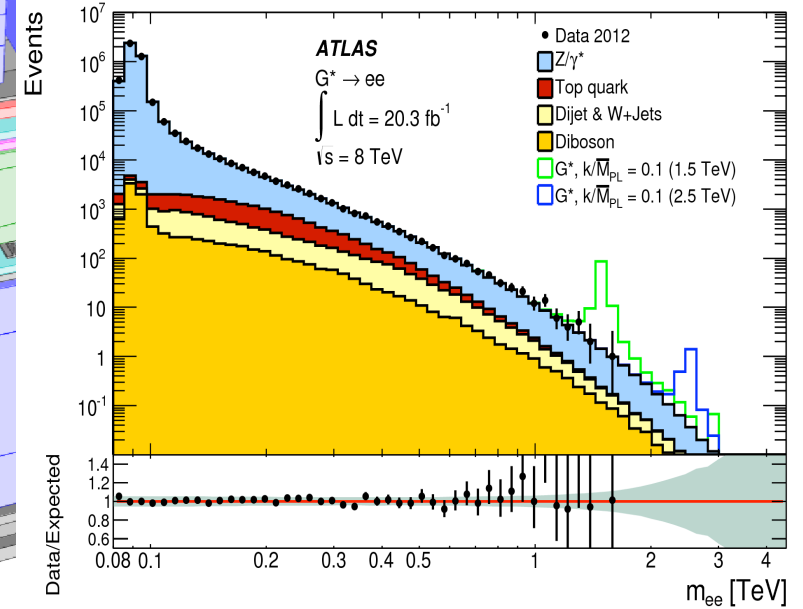
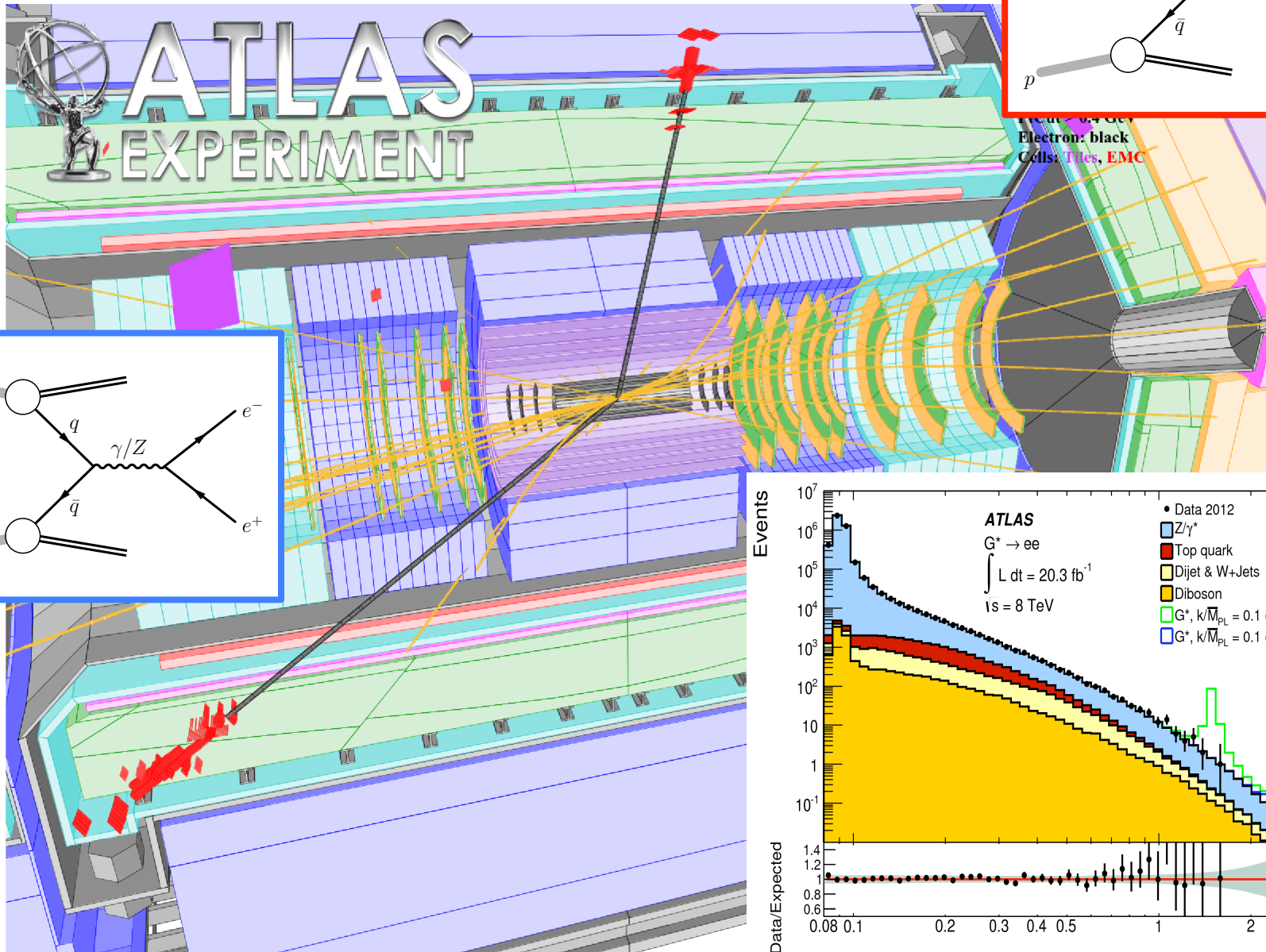
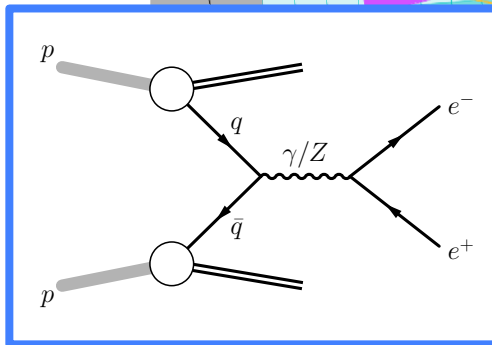
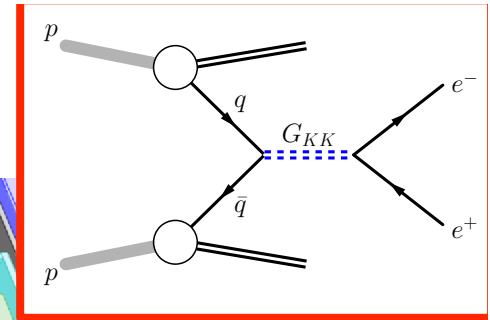


KALUZA – KLEIN GERJESZTÉSEK

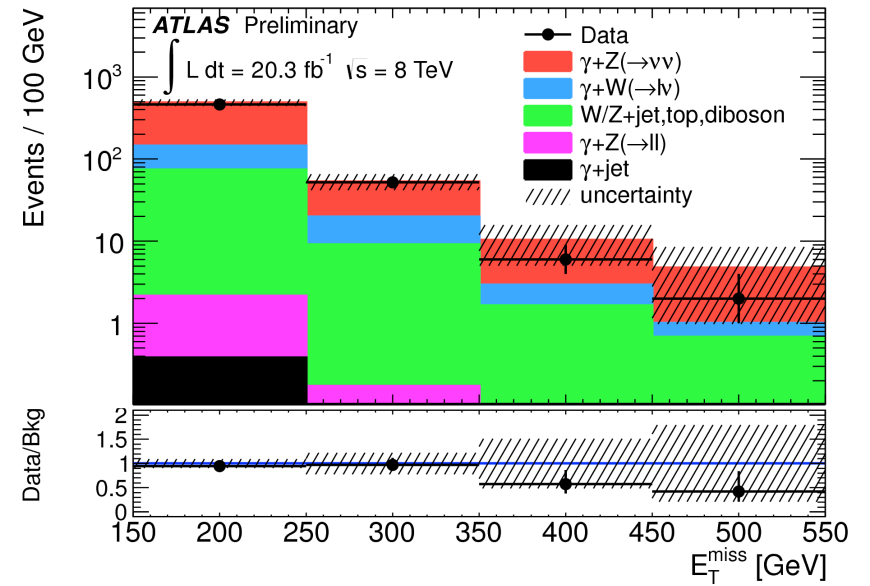
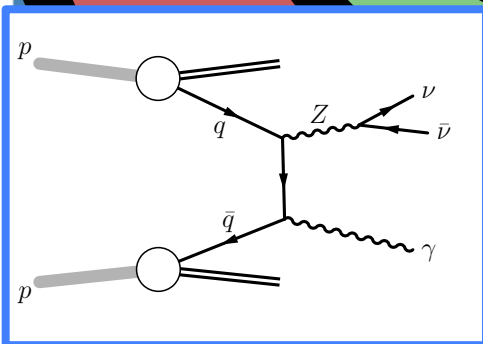
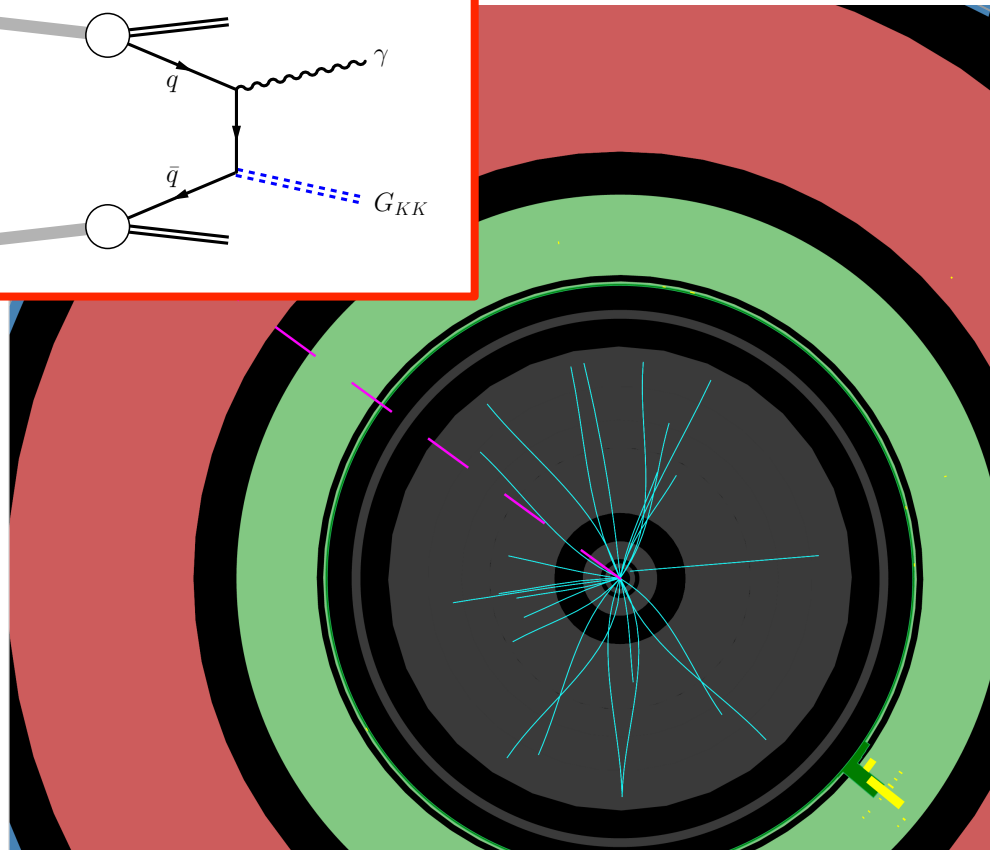
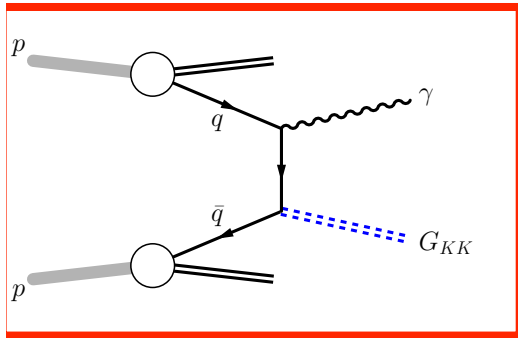
- ED elméletekben az extra dimenziókban is jelenlévő SM részecskéknek magasabb tömegű “gerjesztett” állapotai is vannak
- Ezek tulajdonságai megegyeznek az (alapállapot) SM részecske tulajdonságaival, de tömegük nagyobb
- Ezen részecskéket keresve nagy energiájú részecskeütközésekben az extra dimenziós elméletek nyomaira bukkanhatunk
- A gerjesztett állapotok tömegspektruma az extra dimenziók méretétől (kompaktifikálási sugarától) függ



EXTRA DIMEZIÓKAT KERESVE...



EXTRA DIMEZIÓKAT KERESVE...



ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 179710, Event Number: 19174449

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

KORLÁTOK ED ELMÉLETEK PARAMÉTEREIRE

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Exclusion

Status: March 2015

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (1.0 - 20.3) \text{ fb}^{-1}$ $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

Model	ℓ, γ	Jets	$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	Reference	
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	$\geq 1j$	Yes	20.3	M_D 5.25 TeV	$n = 2$ 1502.01518	
	ADD non-resonant $\ell\ell$	–	–	20.3	M_S 4.7 TeV	$n = 3$ HLZ 1407.2410	
	ADD QBH $\rightarrow \ell q$	$1 e, \mu$	$1j$	–	20.3	M_{th} 5.2 TeV	$n = 6$ 1311.2006
	ADD QBH	–	$2j$	–	20.3	M_{th} 5.82 TeV	$n = 6$ 1407.1376
	ADD BH high N_{trk}	2μ (SS)	–	–	20.3	M_{th} 4.7 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, non-rot BH}$ 1308.4075
	ADD BH high $\sum p_T$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 2j$	–	20.3	M_{th} 5.8 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, non-rot BH}$ 1405.4254
	ADD BH high multijet	–	$\geq 2j$	–	20.3	M_{th} 5.8 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, non-rot BH}$ Preliminary
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$	–	–	20.3	G_{KK} mass 2.68 TeV	$k/\bar{M}_{pl} = 0.1$ 1405.4123
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	2γ	–	–	20.3	G_{KK} mass 2.66 TeV	$k/\bar{M}_{pl} = 0.1$ Preliminary
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow ZZ \rightarrow qq\ell\ell$	$2 e, \mu$	$2j / 1J$	–	20.3	G_{KK} mass 740 GeV	$k/\bar{M}_{pl} = 1.0$ 1409.6190
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow qq\ell\nu$	$1 e, \mu$	$2j / 1J$	Yes	20.3	W mass 700 GeV	$k/\bar{M}_{pl} = 1.0$ 1503.04677
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow HH \rightarrow bbbb$	–	$4b$	–	19.5	G_{KK} mass 590-710 GeV	$k/\bar{M}_{pl} = 1.0$ ATLAS-CONF-2014-005
	Bulk RS $g_{KK} \rightarrow t\bar{t}$	$1 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 1J/2j$	Yes	20.3	g_{KK} mass 2.2 TeV	BR = 0.925 ATLAS-CONF-2015-009
	2UED / RPP	$2 e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	20.3	KK mass 960 GeV	Preliminary

STANDARD MODELLEN TÚLI KORLATOK ÉS ELMELETEK PARAMETEREIRE

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Exclusion

Status: March 2015

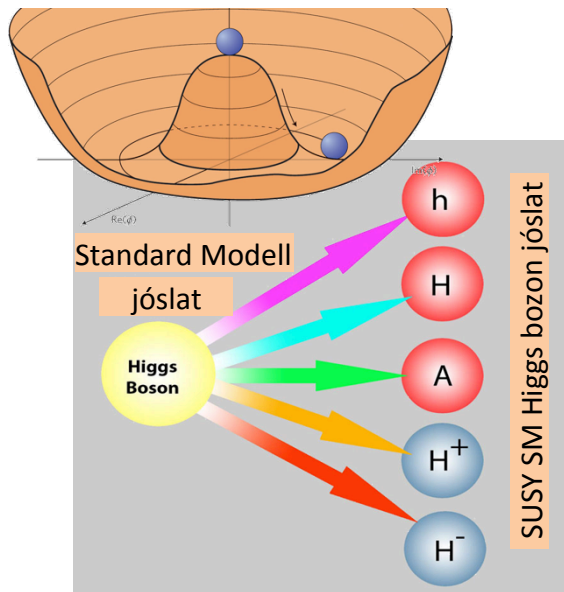
ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (1.0 - 20.3) \text{ fb}^{-1}$ $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

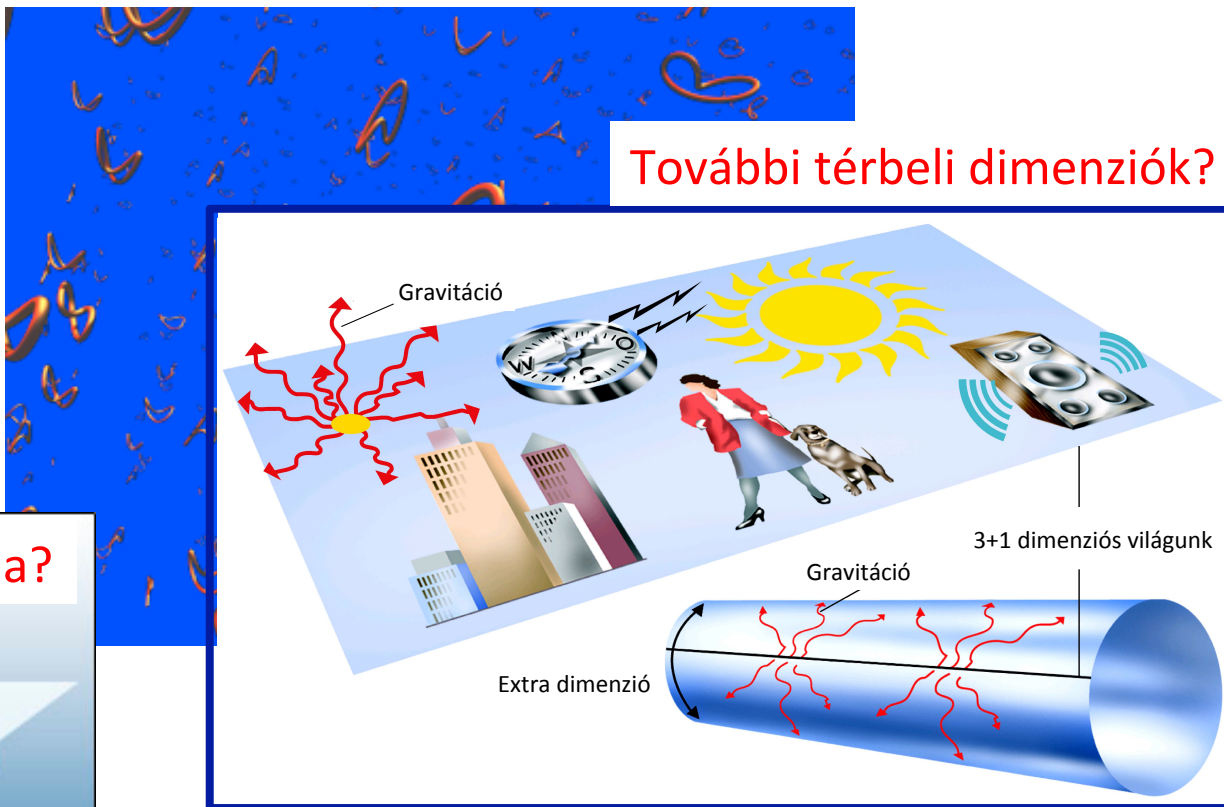
Model	ℓ, γ	Jets	$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	Reference
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	$\geq 1j$	Yes	20.3	M_D 5.25 TeV	$n = 2$ 1502.01518
	ADD non-resonant $\ell\ell$	$2e, \mu$	-	20.3	M_S 4.7 TeV	$n = 3$ HLZ 1407.2410
	ADD QBH $\rightarrow \ell q$	$1e, \mu$	$1j$	-	M_{th} 5.2 TeV	$n = 6$ 1311.2006
	ADD QBH	-	$2j$	-	M_{th} 5.82 TeV	$n = 6$ 1407.1376
	ADD BH high N_{trk}	2μ (SS)	-	-	M_{th} 4.7 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, non-rot BH 1308.4075
	ADD BH high $\sum p_T$	$\geq 1e, \mu$	$\geq 2j$	-	M_{th} 5.8 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, non-rot BH 1405.4254
	ADD BH high multijet	-	$\geq 2j$	-	M_{th} 5.8 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, non-rot BH Preliminary
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	G_{KK} mass 2.68 TeV	$k/\bar{M}_{pl} = 0.1$ 1405.4123
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	2γ	-	-	G_{KK} mass 2.66 TeV	$k/\bar{M}_{pl} = 0.1$ Preliminary
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow ZZ \rightarrow qq\ell\ell$	$2e, \mu$	$2j/1j$	-	G_{KK} mass 740 GeV	$k/\bar{M}_{pl} = 1.0$ 1409.6190
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow qq\ell\nu$	$1e, \mu$	$2j/1j$	Yes	W mass 700 GeV	$k/\bar{M}_{pl} = 1.0$ 1503.04677
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow HH \rightarrow bbbb$	-	$4b$	-	G_{KK} mass 590-710 GeV	$k/\bar{M}_{pl} = 1.0$ ATLAS-CONF-2014-005
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow t\bar{t}$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 1J/2j$	Yes	g_{KK} mass 2.2 TeV	BR = 0.925 ATLAS-CONF-2015-009
	2UED / RPP	$2e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	KK mass 960 GeV	Preliminary
Gauge bosons	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$	-	20.3	Z' mass 2.9 TeV	1405.4123
	SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	2τ	-	19.5	Z' mass 2.02 TeV	1502.07177
	SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	$1e, \mu$	-	Yes 20.3	W' mass 3.24 TeV	1407.7494
	EGM $W' \rightarrow WZ \rightarrow \ell\nu\ell\ell'$	$3e, \mu$	-	Yes 20.3	W' mass 1.52 TeV	1406.4456
	EGM $W' \rightarrow WZ \rightarrow qq\ell\ell$	$2e, \mu$	$2j/1j$	-	W' mass 1.59 TeV	1409.6190
	HVT $W' \rightarrow WH \rightarrow \ell\nu bb$	$1e, \mu$	$2b$	Yes 20.3	W' mass 1.47 TeV	Preliminary
	LRSM $W'_2 \rightarrow tb$	$1e, \mu$	$2b, 0-1j$	Yes 20.3	W' mass 1.92 TeV	1410.4103
	LRSM $W'_2 \rightarrow t\bar{b}$	$0e, \mu$	$\geq 1b, 1j$	-	W' mass 1.76 TeV	1408.0886
CI	CI $qqqq$	-	$2j$	-	Λ 12.0 TeV	$\eta_{LL} = -1$ Preliminary
	CI $qq\ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	Λ 21.6 TeV	$\eta_{LL} = -1$ 1407.2410
	CI $uutt$	$2e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes 20.3	Λ 4.35 TeV	$ C_{LL} = 1$ Preliminary
DM	EFT D5 operator (Dirac)	$0e, \mu$	$\geq 1j$	Yes 20.3	M_* 974 GeV	at 90% CL for $m(\chi) < 100 \text{ GeV}$ 1502.01518
	EFT D9 operator (Dirac)	$0e, \mu$	$1j, \leq 1j$	Yes 20.3	M_* 2.4 TeV	at 90% CL for $m(\chi) < 100 \text{ GeV}$ 1309.4017
LQ	Scalar LQ 1 st gen	$2e$	$\geq 2j$	-	LQ mass 660 GeV	$\beta = 1$ 1112.4828
	Scalar LQ 2 nd gen	2μ	$\geq 2j$	-	LQ mass 685 GeV	$\beta = 1$ 1203.3172
	Scalar LQ 3 rd gen	$1e, \mu, 1\tau$	$1b, 1j$	-	LQ mass 534 GeV	$\beta = 1$ 1303.0526
Heavy quarks	VLQ $TT \rightarrow Ht + X, Wb + X$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 3j$	Yes 20.3	T mass 785 GeV	isospin singlet ATLAS-CONF-2015-012
	VLQ $TT \rightarrow Zt + X$	$2l \geq 3e, \mu$	$\geq 2l \geq 1b$	-	T mass 735 GeV	T in (T,B) doublet 1409.5500
	VLQ $BB \rightarrow Zb + X$	$2l \geq 3e, \mu$	$\geq 2l \geq 1b$	-	B mass 755 GeV	B in (B,Y) doublet 1409.5500
	VLQ $BB \rightarrow Wt + X$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 5j$	Yes 20.3	B mass 640 GeV	isospin singlet Preliminary
	$T_{5/3} \rightarrow Wt$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 5j$	Yes 20.3	$T_{5/3}$ mass 840 GeV	Preliminary
Excited fermions	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	1γ	$1j$	-	q^* mass 3.5 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$ 1309.3230
	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	$2j$	-	q^* mass 4.09 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$ 1407.1376
	Excited quark $b^* \rightarrow Wt$	1 or $2e, \mu$	$1b, 2j$ or $1j$	Yes 4.7	b^* mass 870 GeV	left-handed coupling 1301.1583
	Excited lepton $\ell^* \rightarrow \ell\gamma$	$2e, \mu, 1\gamma$	-	-	ℓ^* mass 2.2 TeV	$\Lambda = 2.2 \text{ TeV}$ 1308.1364
	Excited lepton $\nu^* \rightarrow \ell W, \nu Z$	$3e, \mu, \tau$	-	-	ν^* mass 1.6 TeV	$\Lambda = 1.6 \text{ TeV}$ 1411.2921
Other	LSTC $a_T \rightarrow W\gamma$	$1e, \mu, 1\gamma$	-	Yes 20.3	a_T mass 960 GeV	1407.8150
	LRSM Majorana ν	$2e, \mu$	$2j$	-	N^0 mass 1.5 TeV	$m(W_R) = 2 \text{ TeV}$, no mixing 1203.5420
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$ (SS)	-	-	$H^{\pm\pm}$ mass 551 GeV	DY production, BR($H_L^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$)=1 1412.0237
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$	$3e, \mu, \tau$	-	-	$H^{\pm\pm}$ mass 400 GeV	DY production, BR($H_L^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$)=1 1411.2921
	Monotop (non-res prod)	$1e, \mu$	$1b$	Yes 20.3	spin-1 invisible particle mass 657 GeV	$a_{\text{non-res}} = 0.2$ 1410.5404
	Multi-charged particles	-	-	-	multi-charged particle mass 785 GeV	DY production, $ q = 5e$ Preliminary
	Magnetic monopoles	-	-	-	monopole mass 862 GeV	DY production, $ g = 1g_D$ 1207.6411

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

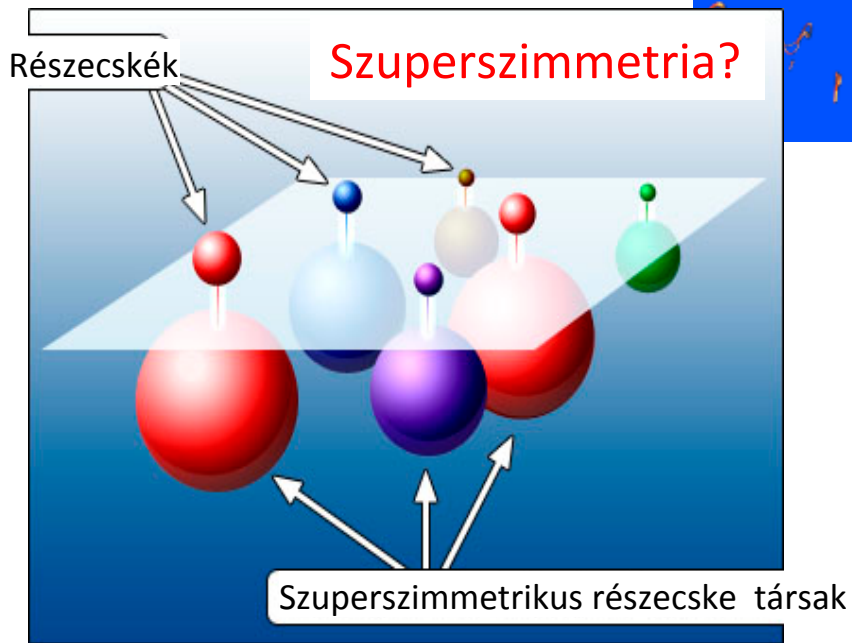
Újabb Higgs részecskék?



MIT HOZ A JÖVŐ?

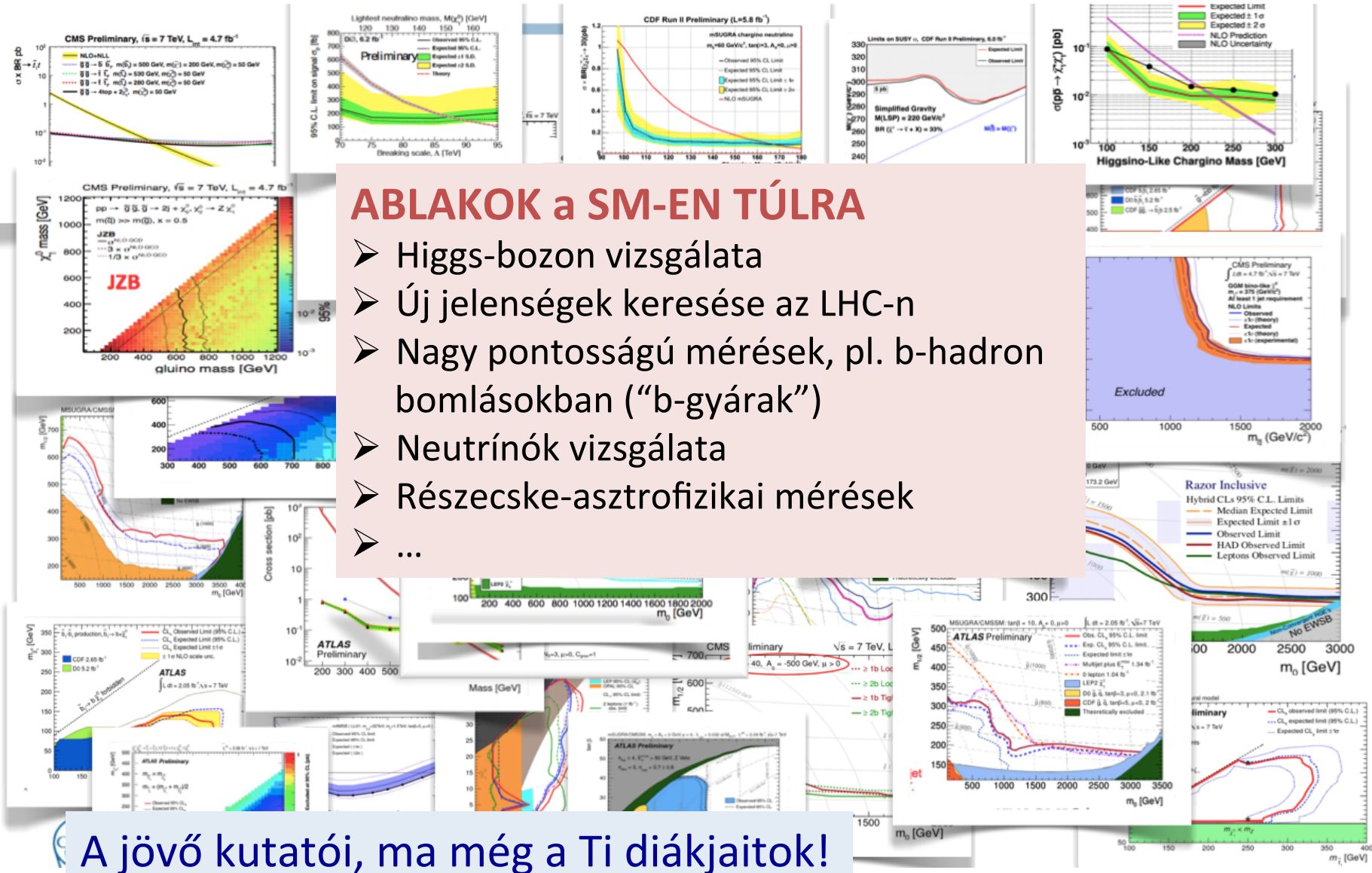


További térbeli dimenziók?



Új kölcsönhatások? Nem várt meglepetés?

TOVÁBBI HIGGS-BOZONOK? SZUPERSZIMMETRIA? EXOTIKUS MODELLEK?



ABLAKOK a SM-EN TÚLRA

- Higgs-bozon vizsgálata
- Új jelenségek keresése az LHC-n
- Nagy pontosságú mérések, pl. b-hadron bomlásokban (“b-gyárak”)
- Neutrínók vizsgálata
- Részecske-asztrofizikai mérések
- ...

A jövő kutatói, ma még a Ti diákjaitok!