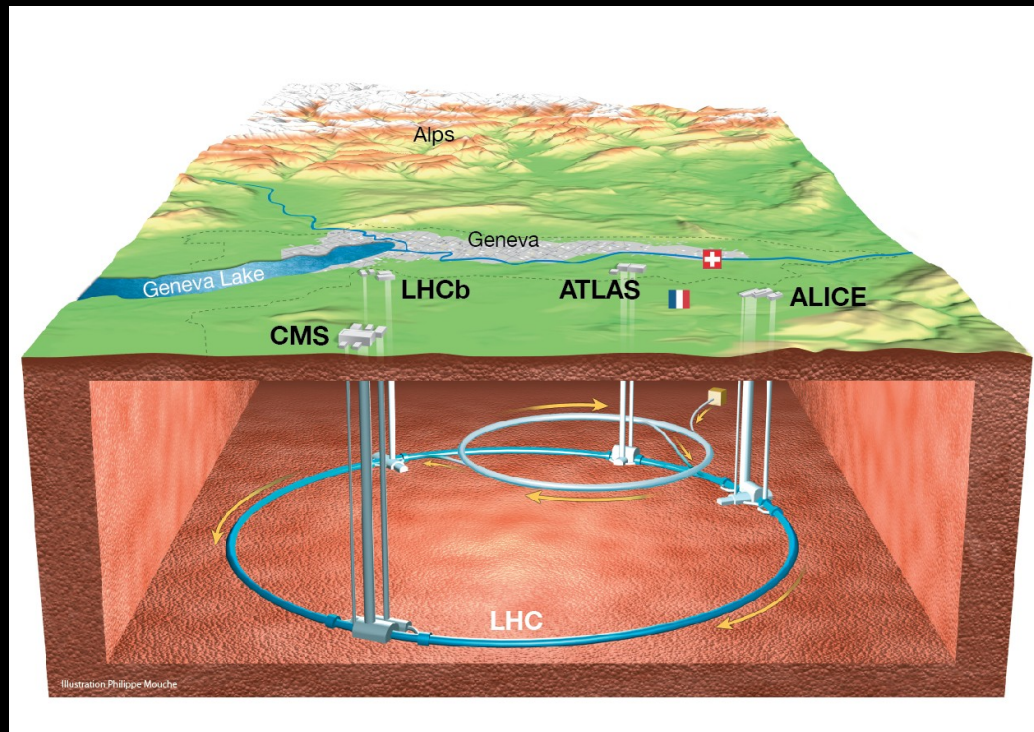
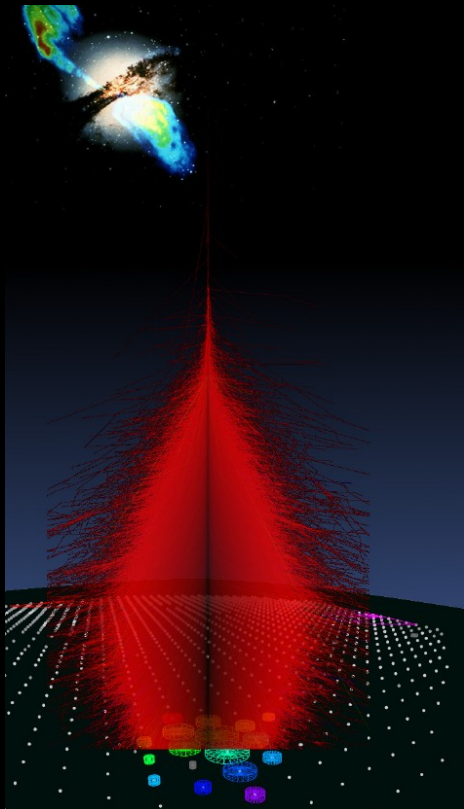


Kozmikus sugárzás a laborban...?



Veres Gábor
ELTE, Fizikai Intézet
Atomfizikai Tanszék
vg@ludens.elte.hu

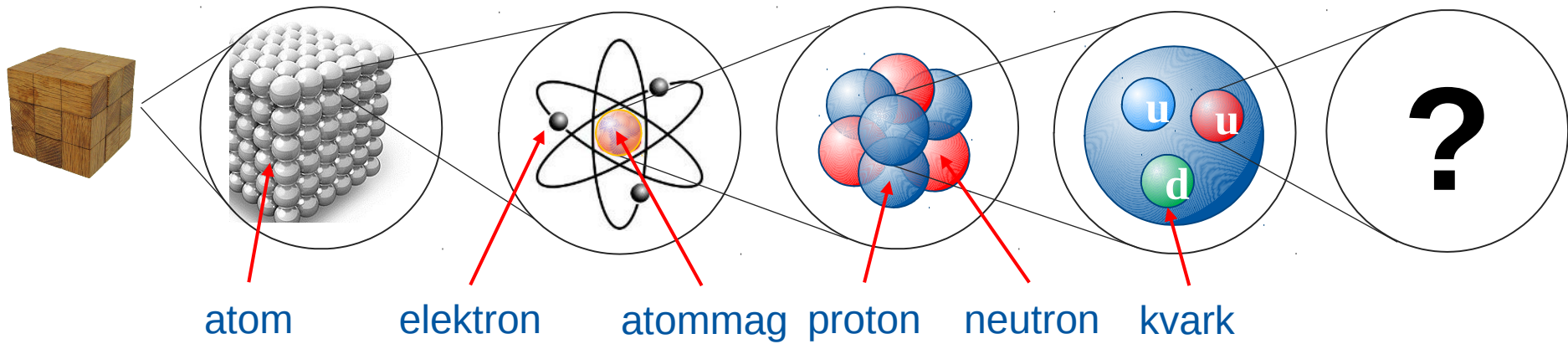
Az Atomoktól a Csillagokig
ELTE, 2018. január 31.

Méretskálák a természetben

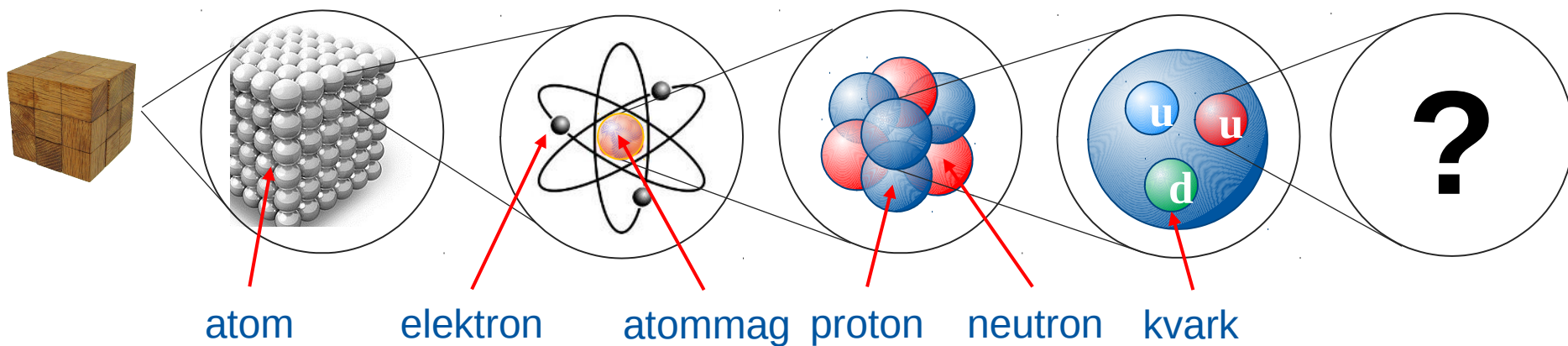


A részecskefizika az anyag legparányibb építőköveit vizsgálja módszeres alapossággal

Miből áll az anyag?



Miből áll az anyag?



LEPTONOK

ELEKTRON



ELEKTRON
NEUTRÍNÓ



MÜON



MÜON
NEUTRÍNÓ



TAU



TAU
NEUTRÍNÓ



KVARKOK

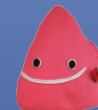
UP



DOWN



CHARM



STRANGE



TOP



BOTTOM



Miből áll az anyag?

LEPTONOK

ELEKTRON



ELEKTRON
NEUTRÍNÓ



MÜON



MÜON
NEUTRÍNÓ



TAU



TAU
NEUTRÍNÓ



KVARKOK

UP



DOWN



CHARM



STRANGE



TOP



BOTTOM



Az anyagi részecskék közötti kölcsönhatások:

GLUON



Erős kölcsönhatás

FOTON



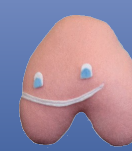
Elektromágneses kölcsönhatás

BOZONOK



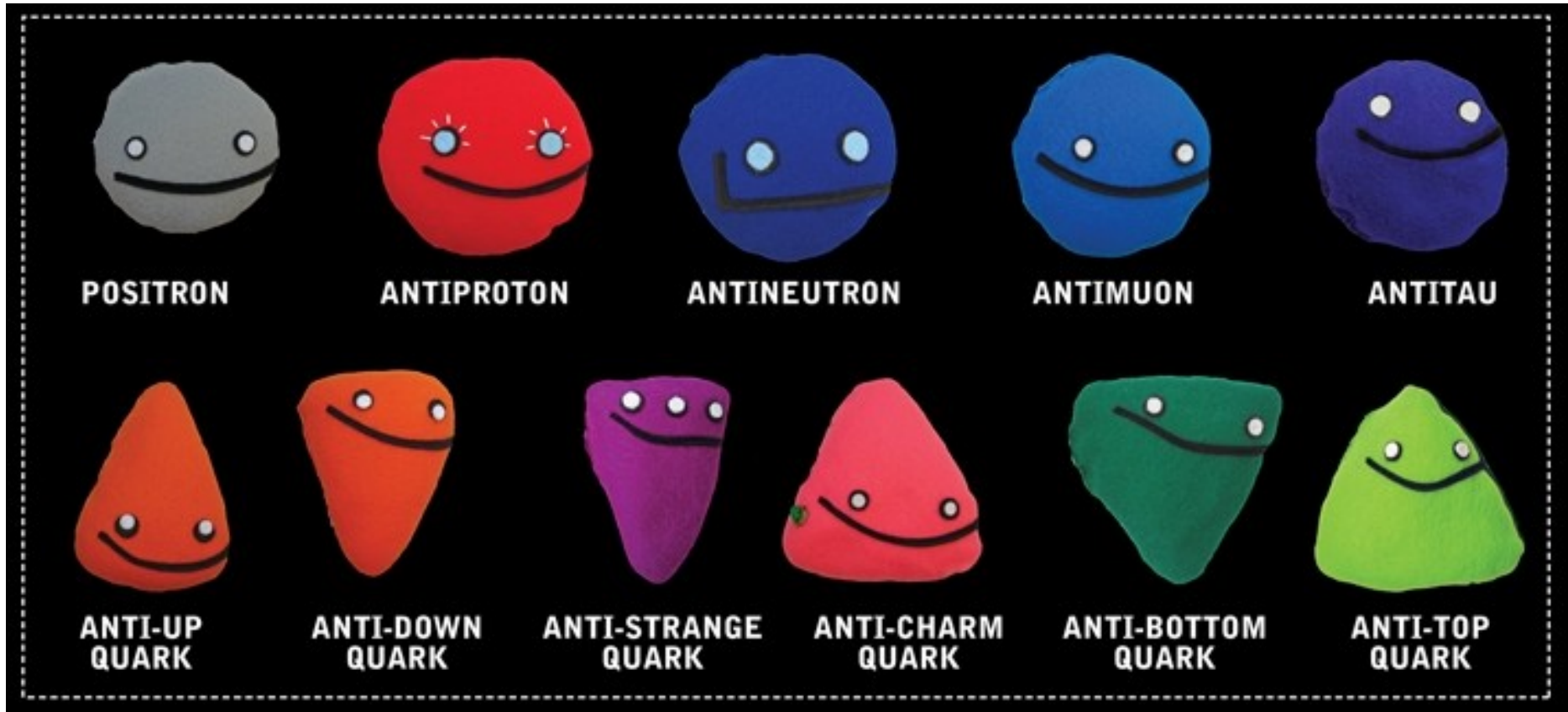
Gyenge kölcsönhatás

GRAVITON



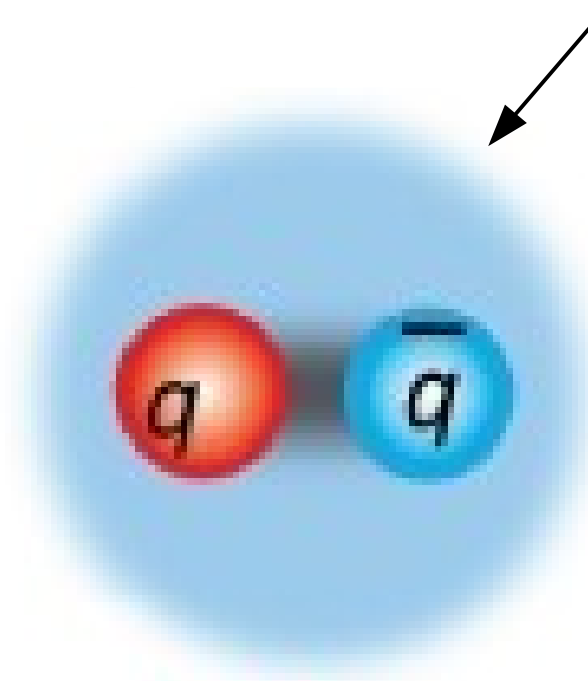
Gravitáció

Miből áll az ANTIanyag?

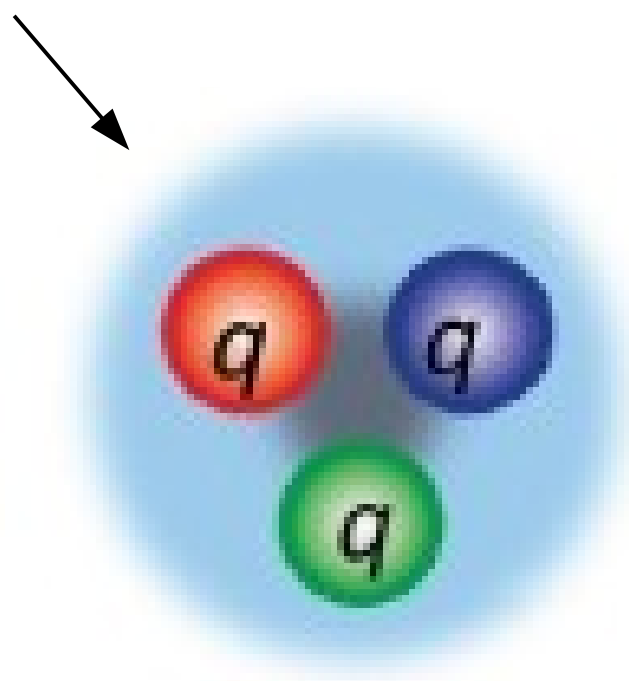


Milyen részecskéket építhetünk kvarkokból?

HADRONOKAT



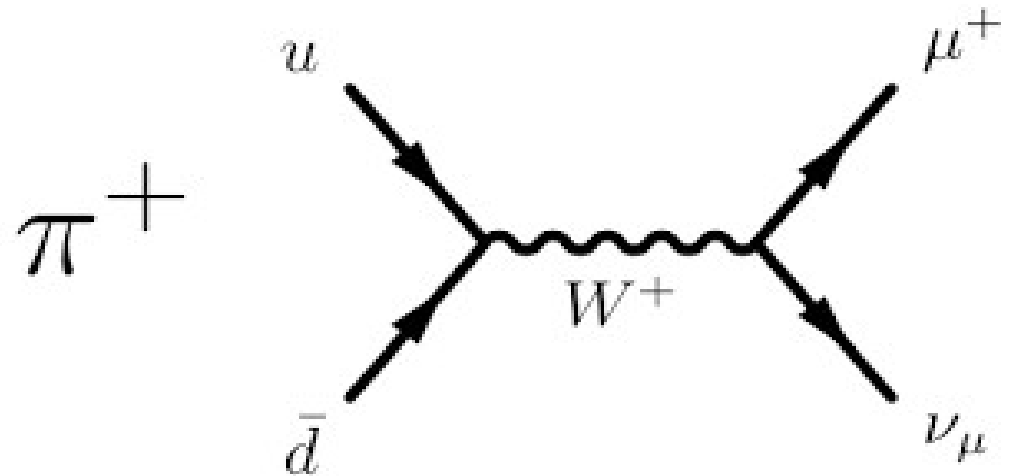
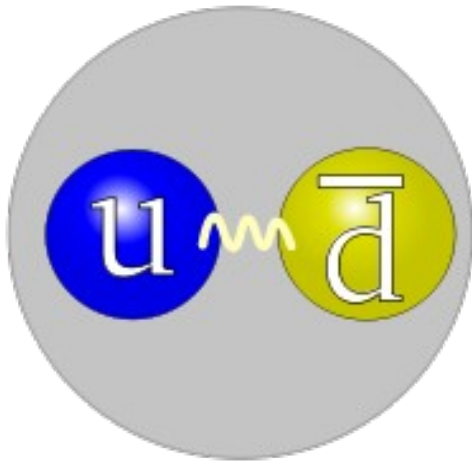
MEZONOKAT



BARIONOKAT

Pion: a legkönnyebb mezon

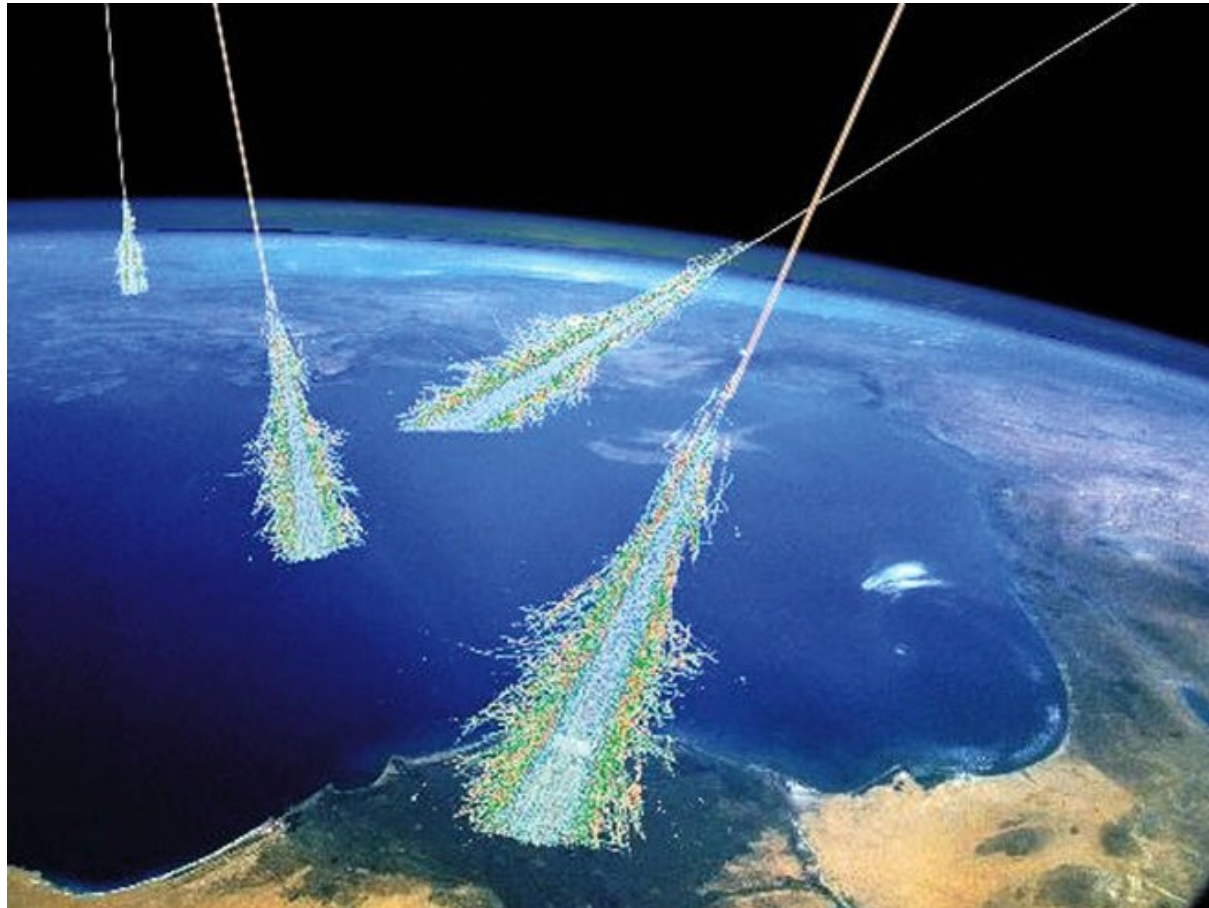
- Részecske-ütközésekben ez keletkezik leggyakrabban
- Töltött pion: müonra bomlik!



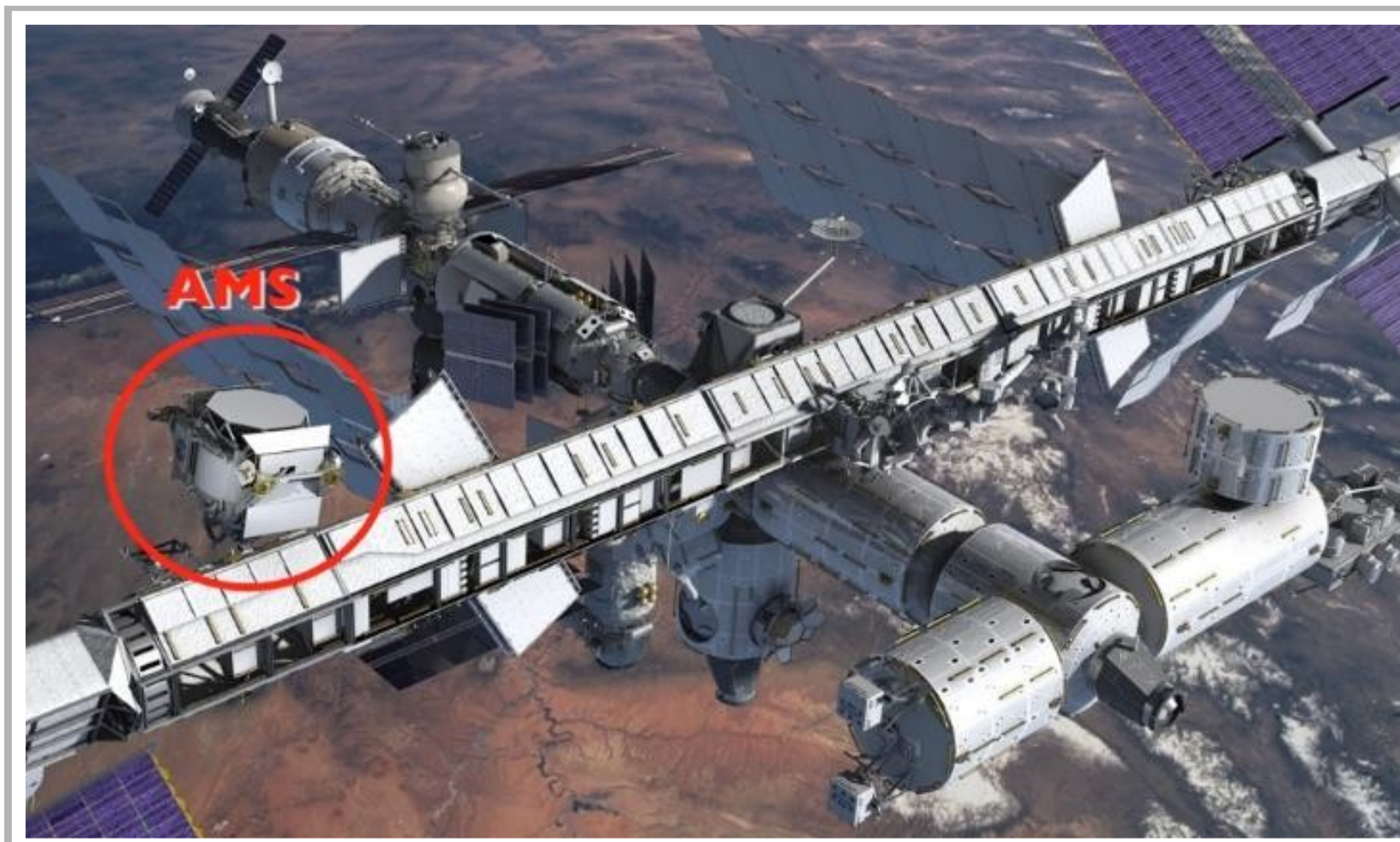
- Semleges pion: két fotonra bomlik!

Kozmikus sugárzás

Protonok, Elektronok, gamma részecskék, atommagok...
Eredete: Nap, illetve a Naprendszeren kívülről, távoli galaxisokból

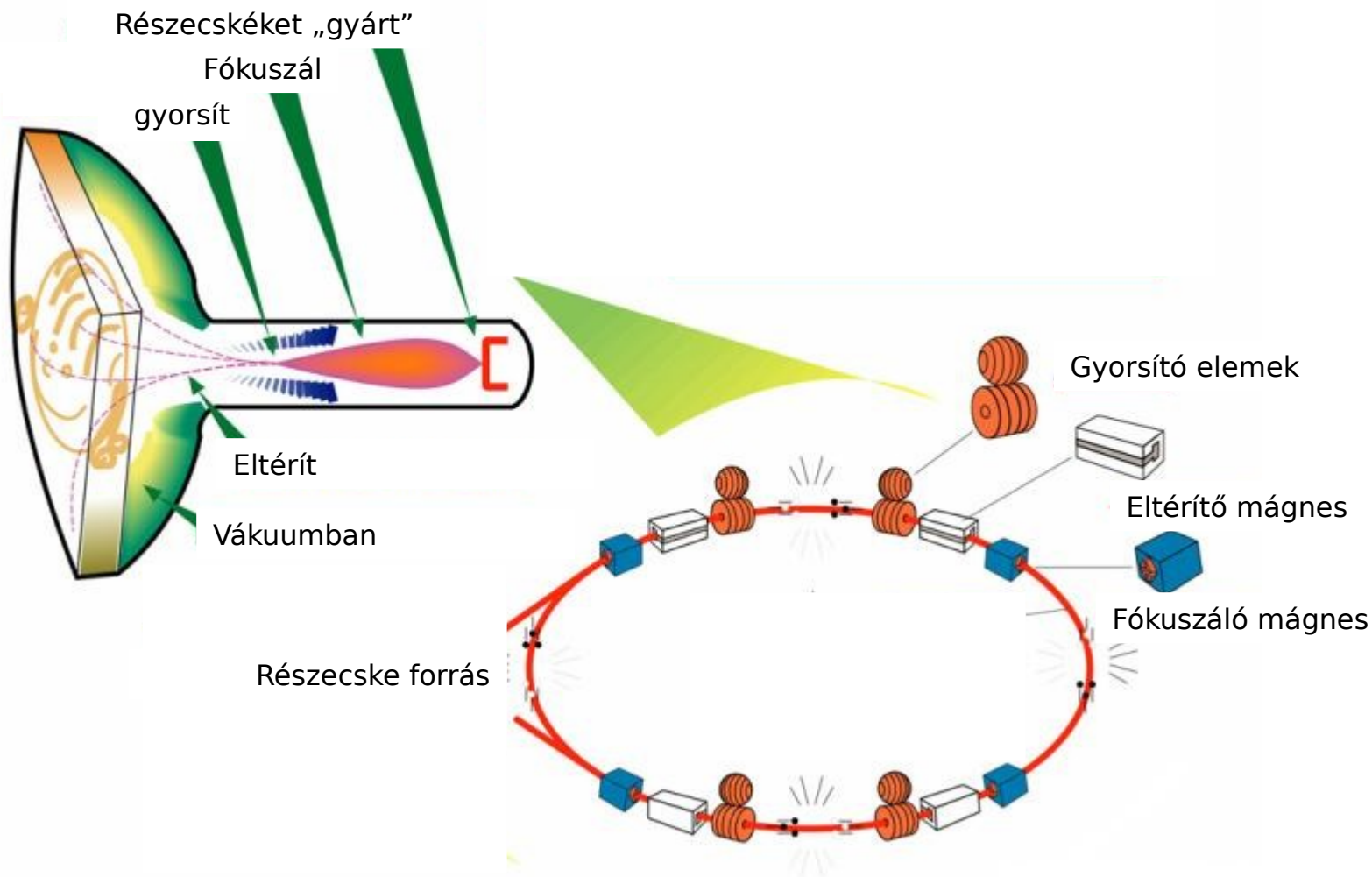


Kozmikus sugárzás vizsgálata



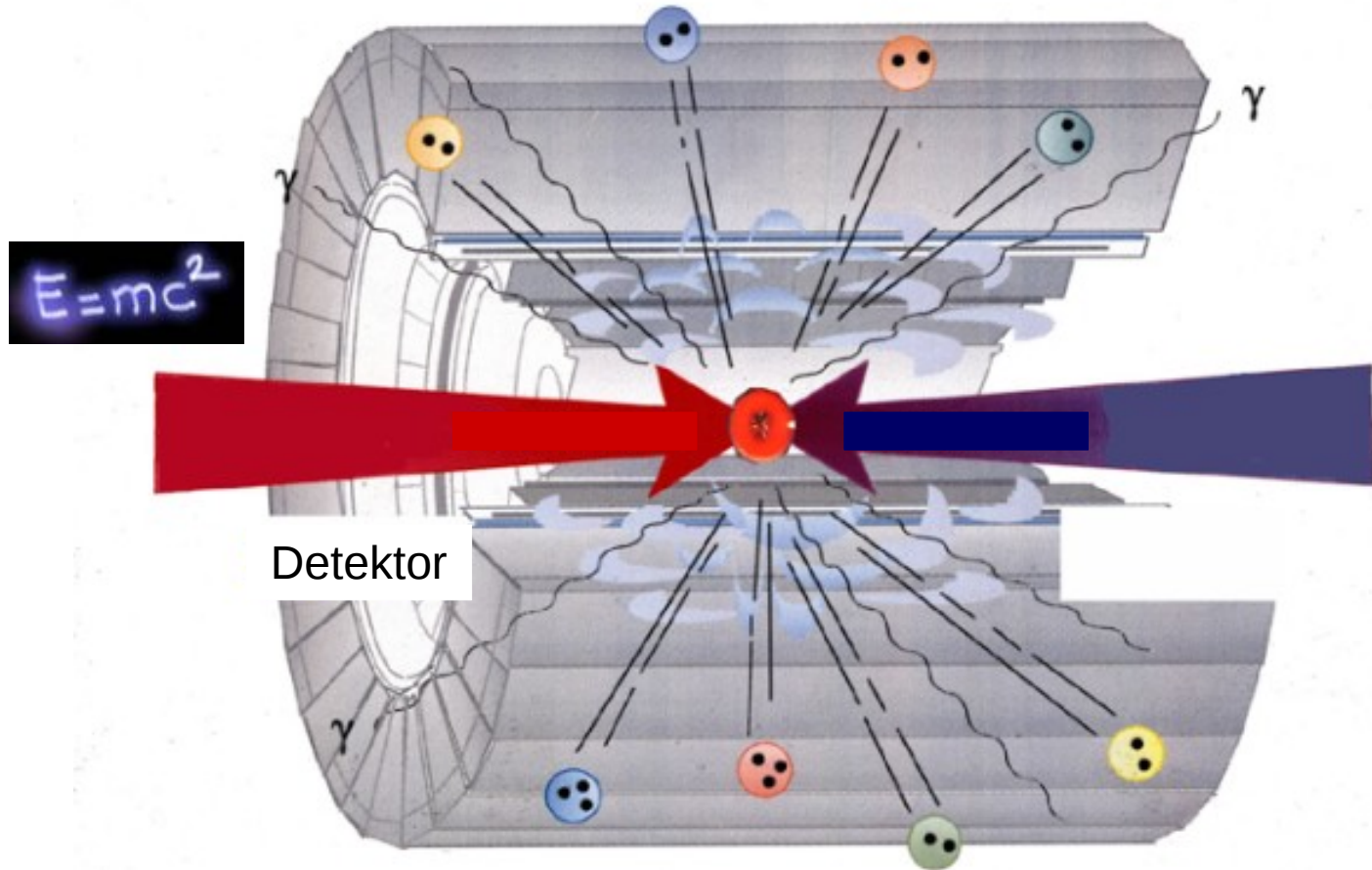
Nemrég még mindenkinek volt részecskegyorsítója!

a hagyományos televíziós készülék!





Kutatási módszer

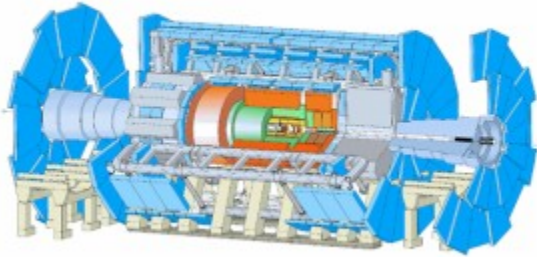


1) Energiakonzentráció: a részecskék **gyorsítása**

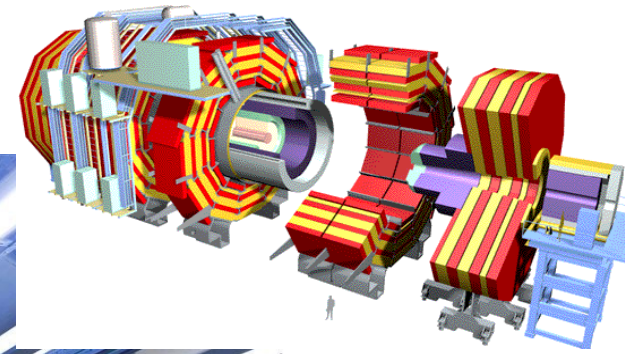
2) Részecskék **ütköztetése** (ősrobbanás - közeli állapot előidézése)

3) Létrehozott részecskék azonosítása a **detektorban** (új fizika keresése)

Az LHC megváltoztathatja a világegyetemről alkotott képünket



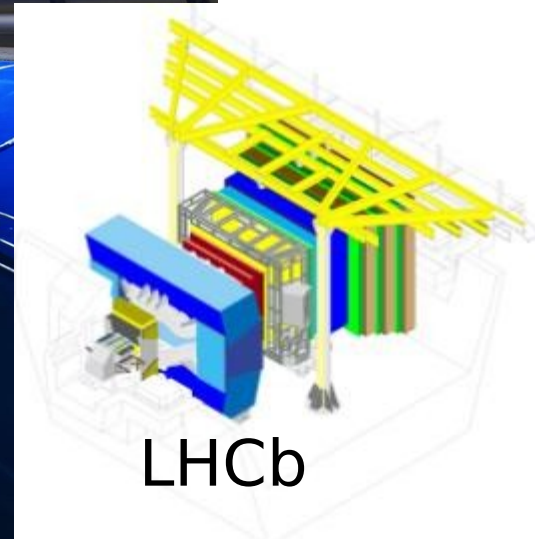
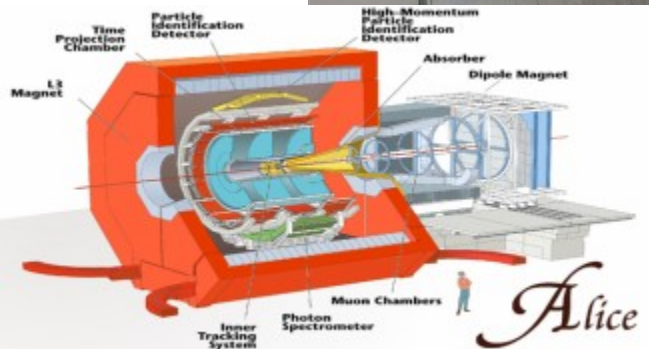
ATLAS



CMS



ALICE



LHCb



CERN svájci campus

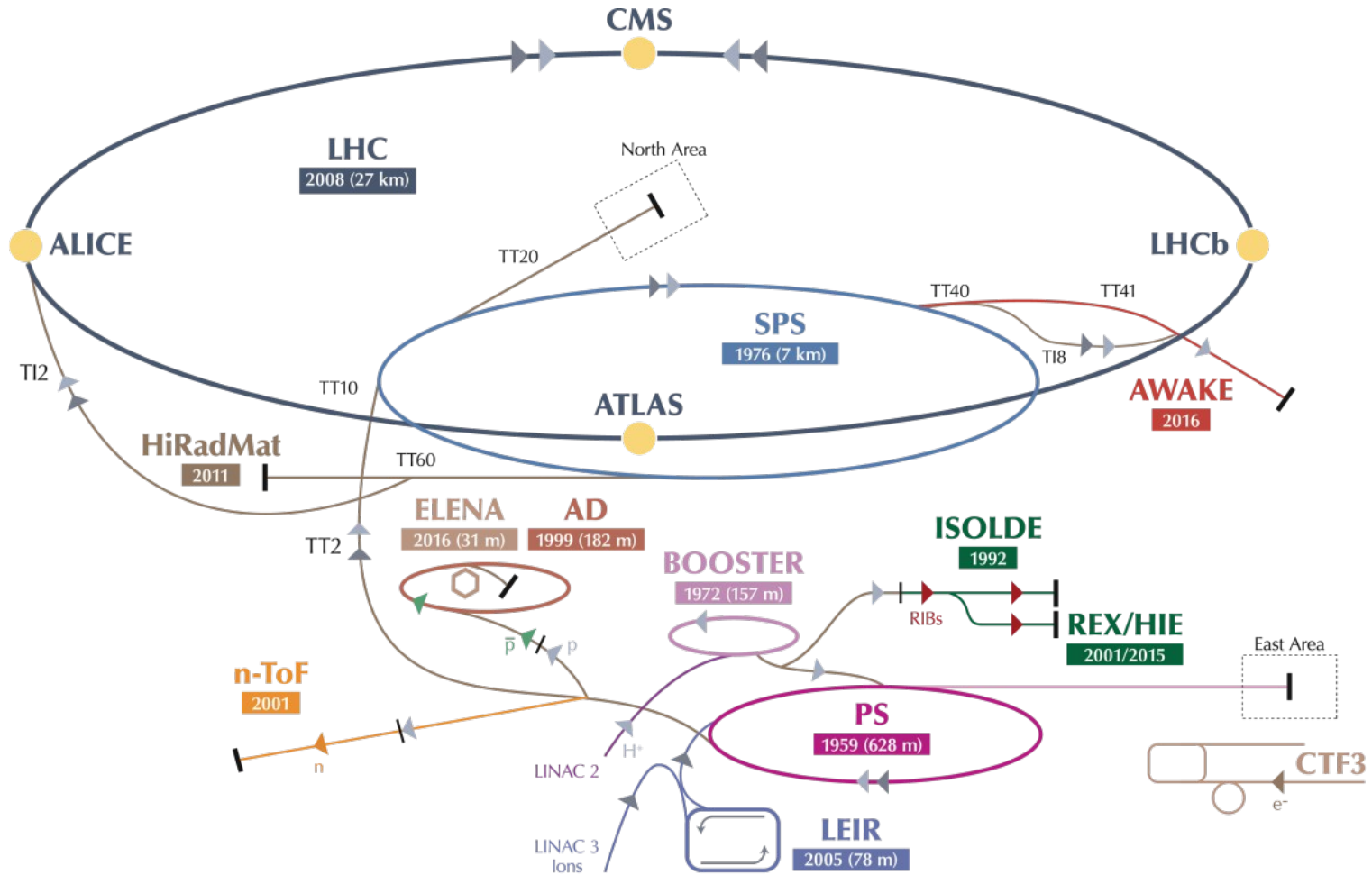
CERN francia campus

SPS gyorsító

Genfi repülőtér

LHC gyorsító

A CERN gyorsítókomplexuma



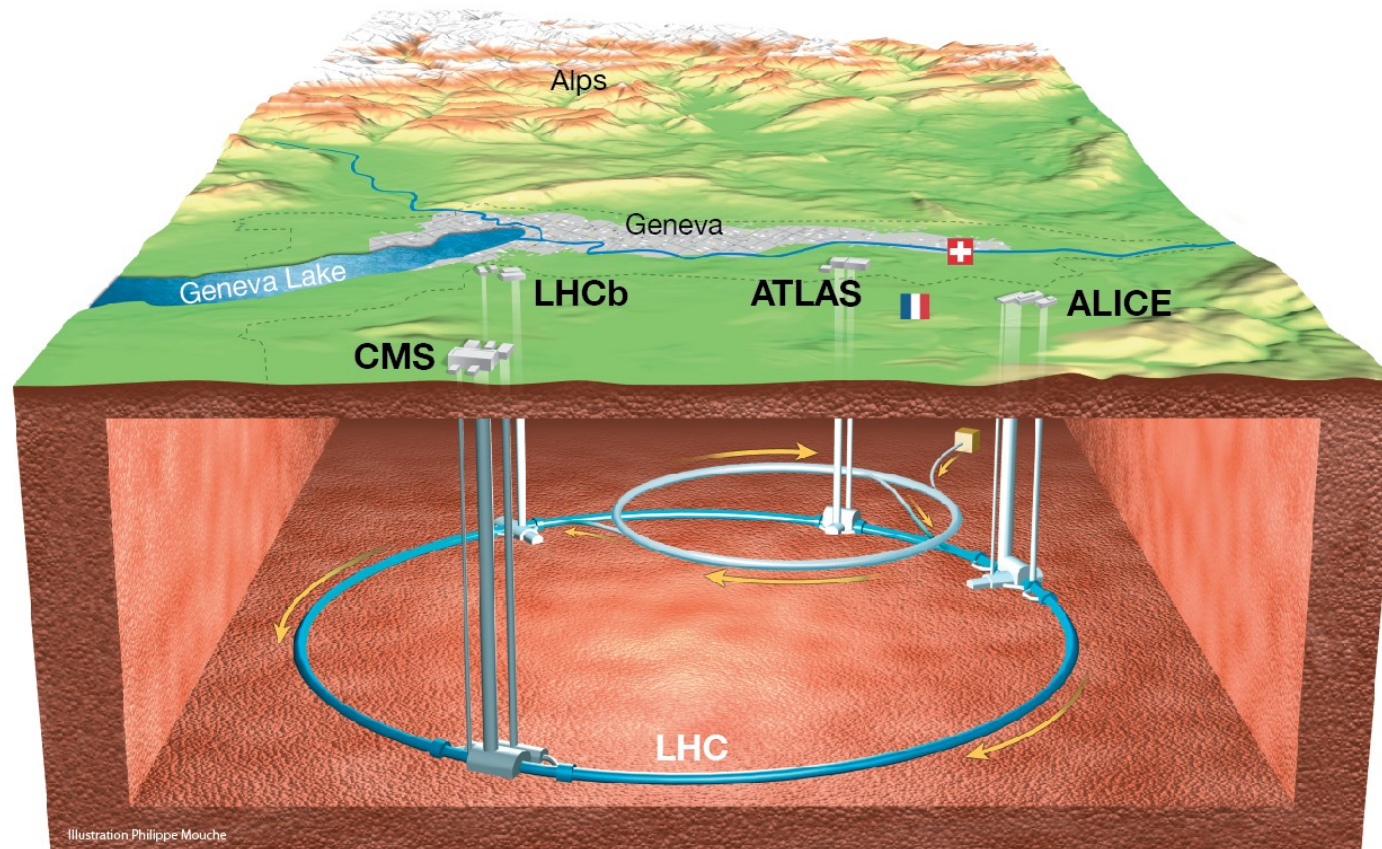
- ▶ p (protons)
- ▶ ions
- ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
- ▶ n (neutrons)
- ▶ \bar{p} (antiprotons)
- ▶ e^- (electrons)
- ▶↔↔ proton/antiproton conversion
- ▶↔↔ proton/RIB conversion

A Nagy Hadron Ütköztető (LHC) a valaha épített legnagyobb, az elemi részecskék vizsgálatára szolgáló tudományos mérőberendezés.

Négy hatalmas földalatti csarnok készült az óriási detektorok számára

A világ legnagyobb teljesítményű tudományos részecskegyorsítója

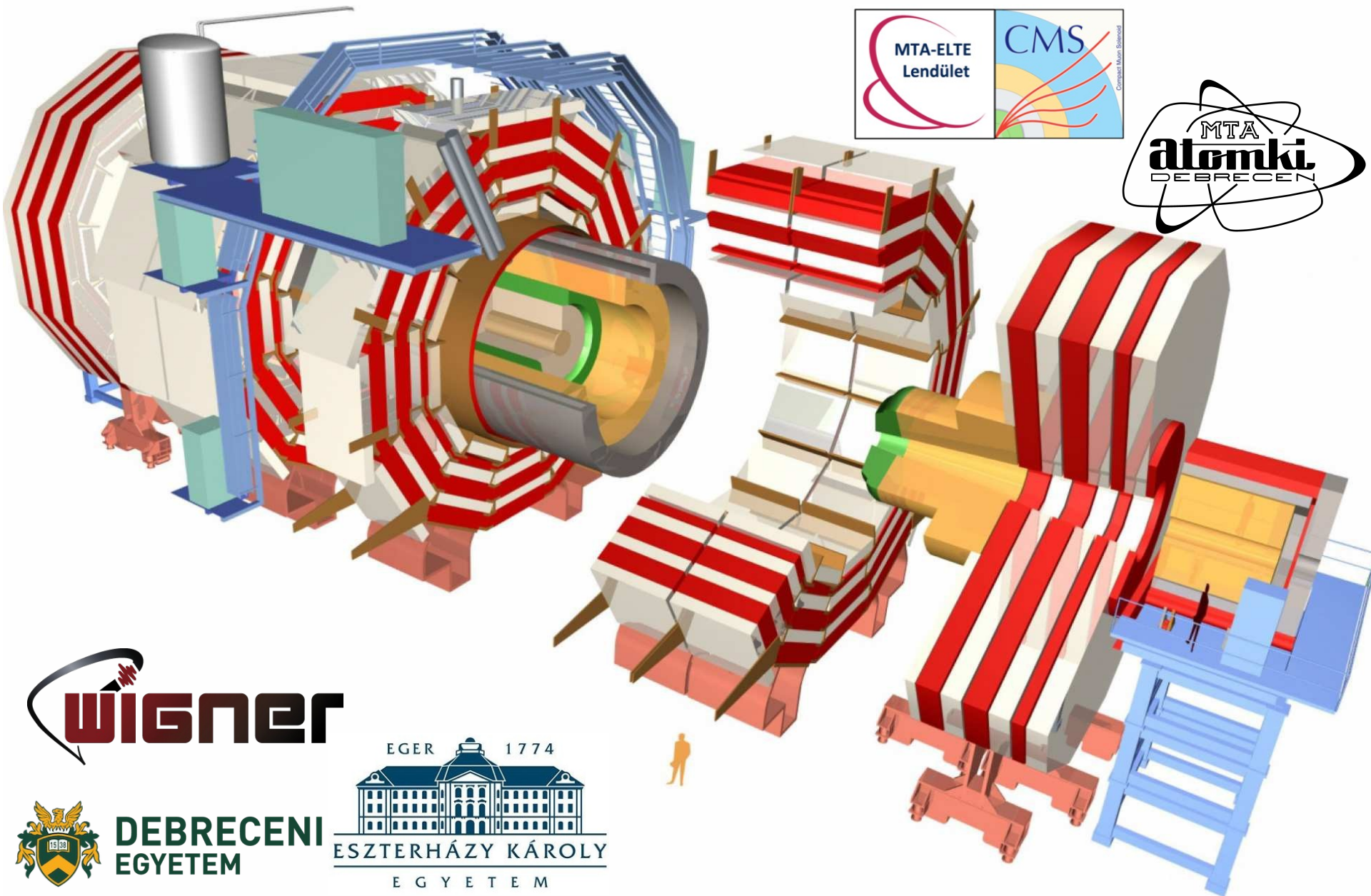
Szupravezető mágnesei alacsonyabb hőmérsékletűek mint a világűr hidege





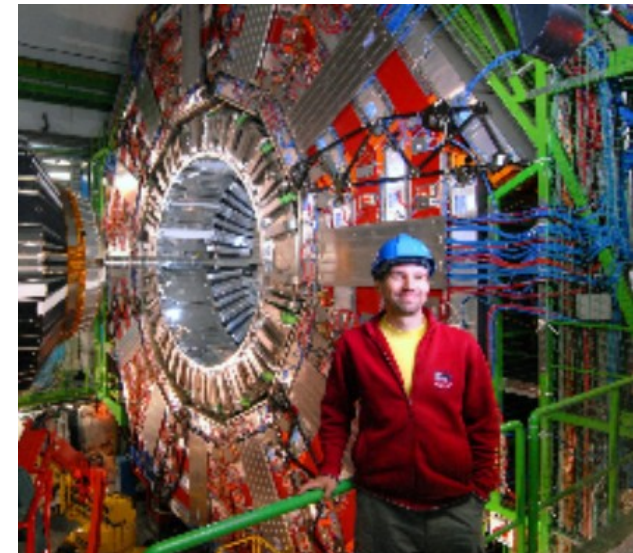
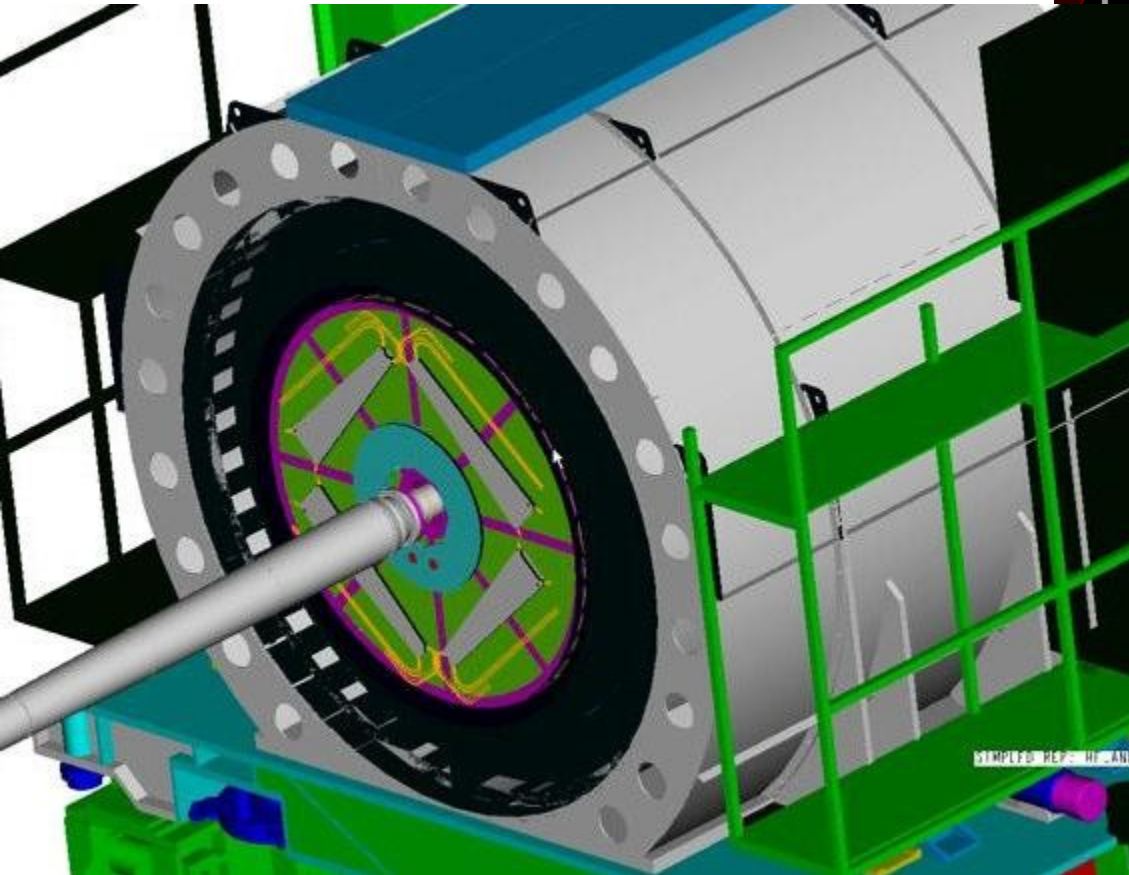
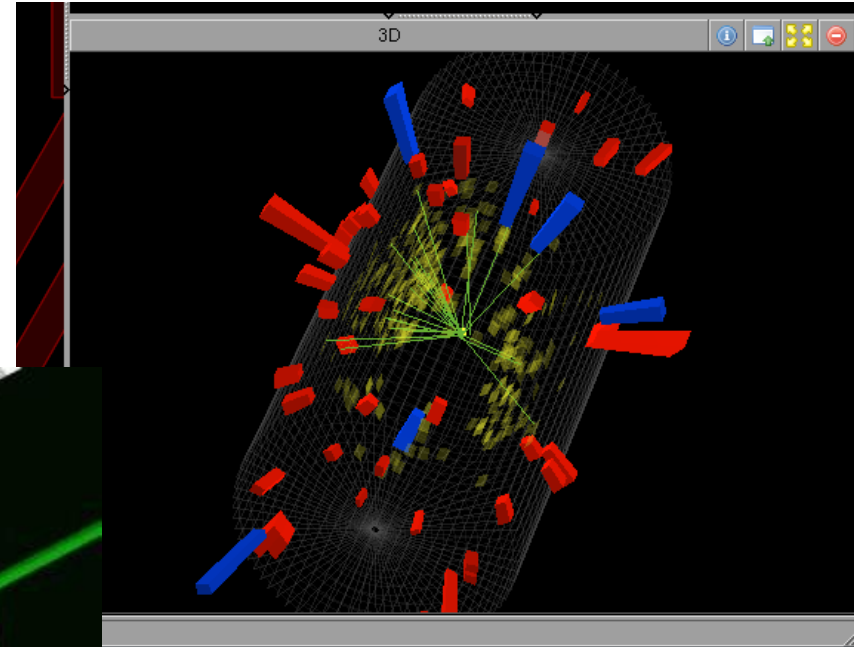
Accélérateur de particules

CMS kísérlet: ELTE és magyar résztvevő intézmények



Első ütközések az LHC-ben: trigger rendszer

2009. nov. 23. 19:20:55
Első proton-proton ütközés
az LHC-ben

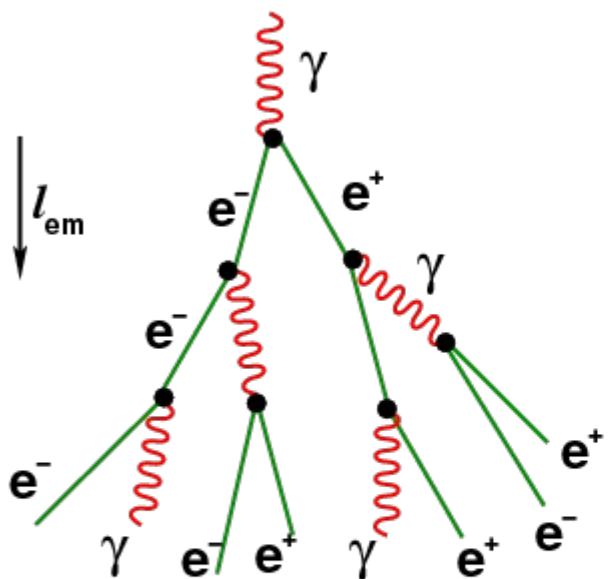


Sok nyitott kérdés van még!

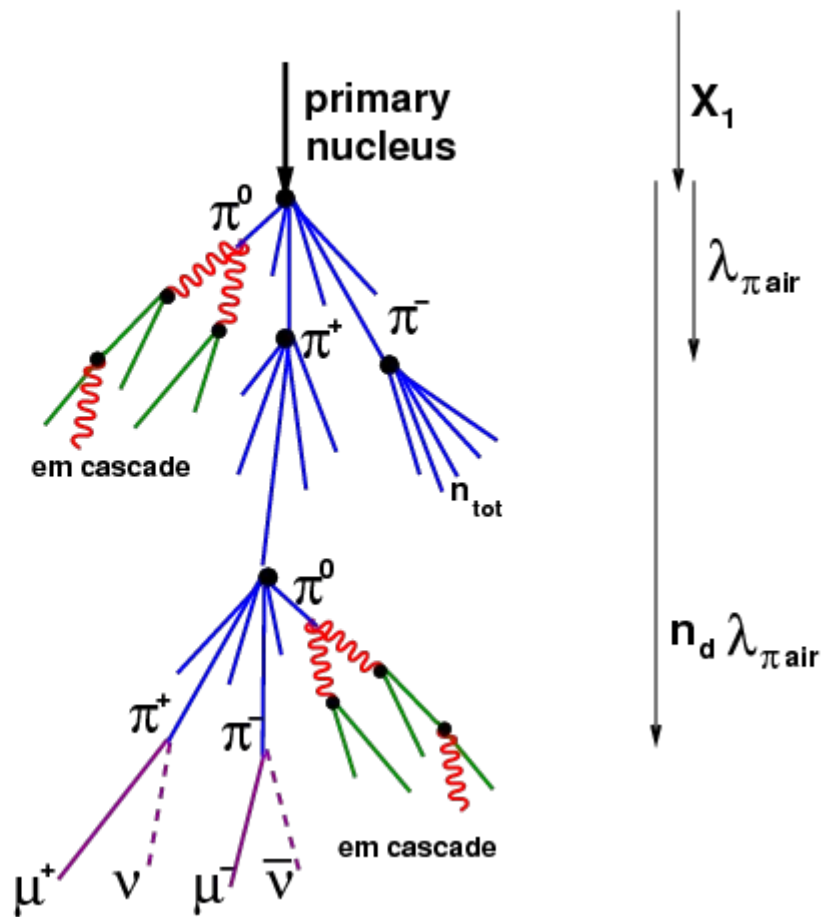


Kozmikus zápor

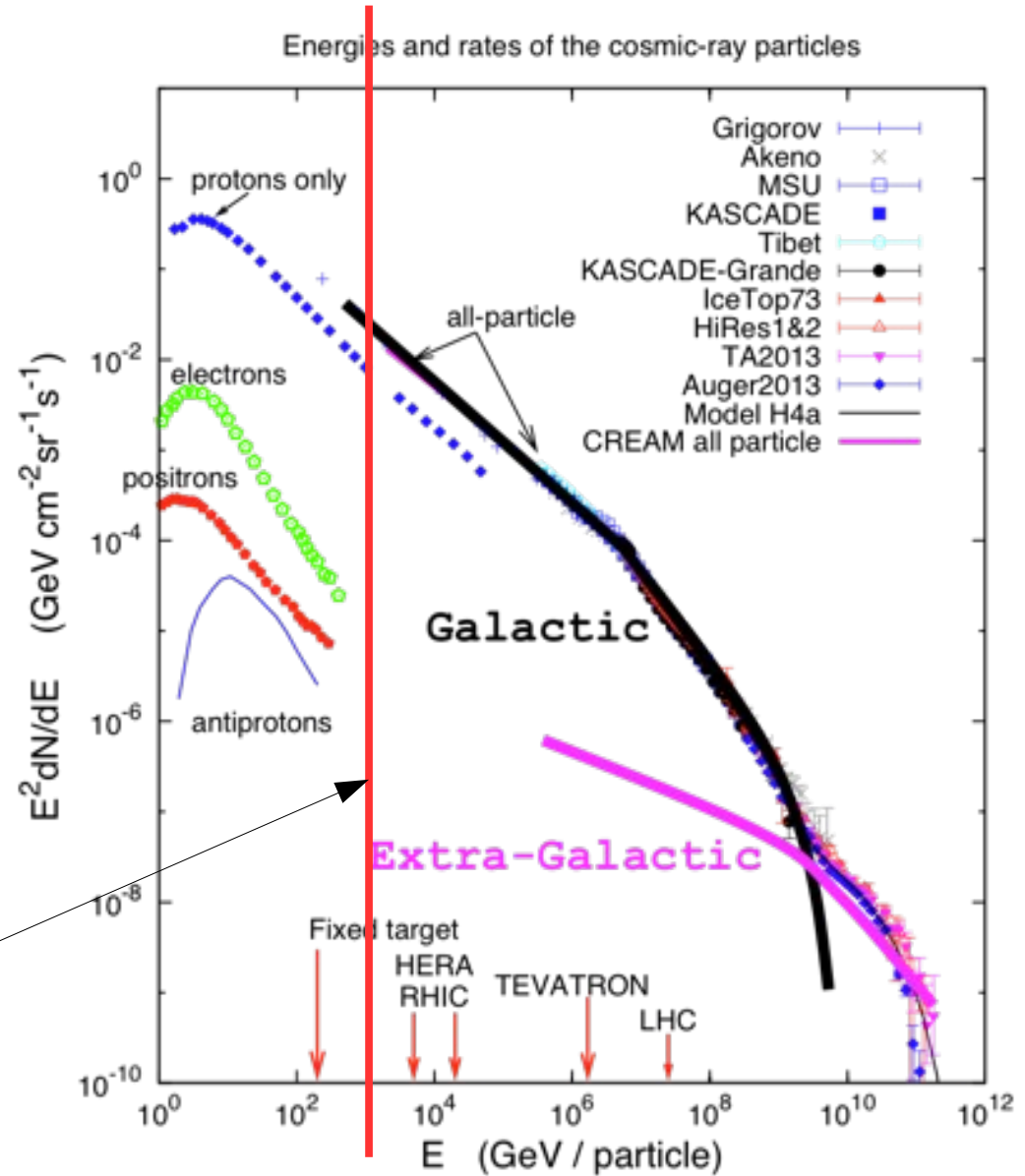
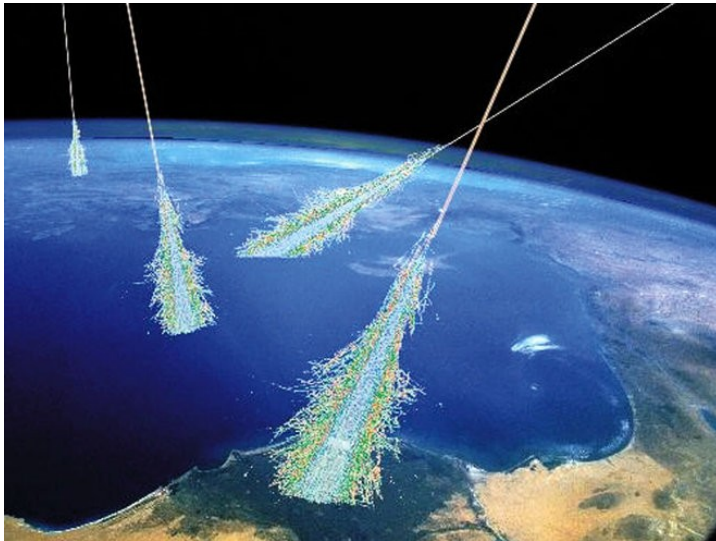
Elektromágneses zápor



Hadronikus zápor



Kozmikus sugárzás



Hány kozmikus részecske érkezik a Földre másodpercenként?

Energiától függ!!!

Például 1 TeV energia fölött:
 10^{14} részecske/másodperc

Energia: kicsi vagy nagy?

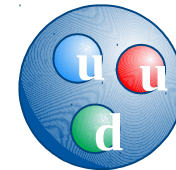
$$7 \text{ TeV} = 1 \mu\text{J}$$

Repülő szúnyog?

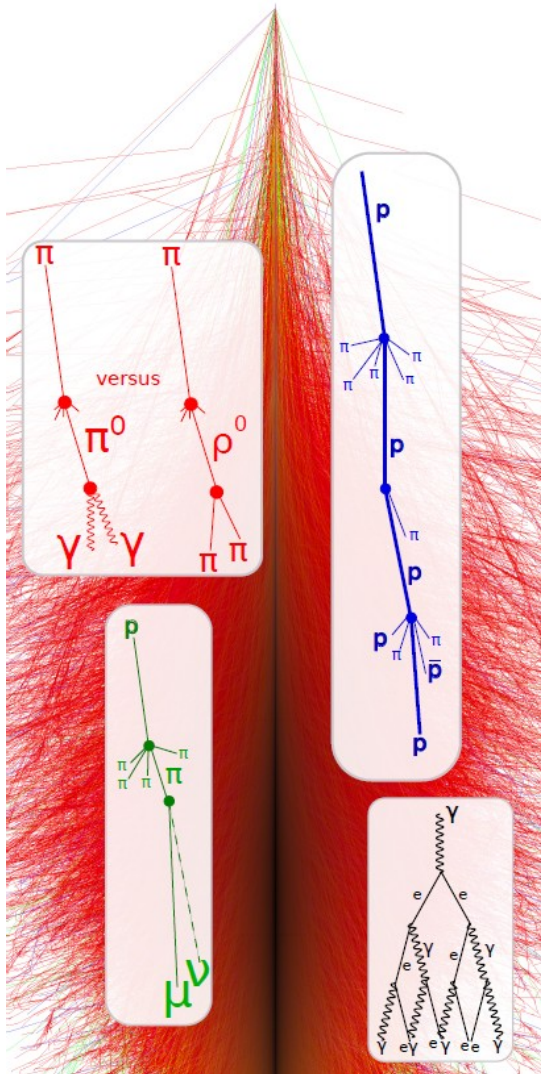
$$\begin{aligned} M &= 2.5 - 10 \text{ mg} \\ V &= 0.4 - 0.7 \text{ m/s} \\ E &= MV^2/2 = \\ &= 0.2 - 2.5 \mu\text{J} = \\ &= 1.2 - 15 \text{ TeV} \end{aligned}$$



1'000'000'000'000'000'000'000



Kiterjedt kozmikus záporok: ultranagy energiájú kozmikus sugarak (UHECR)



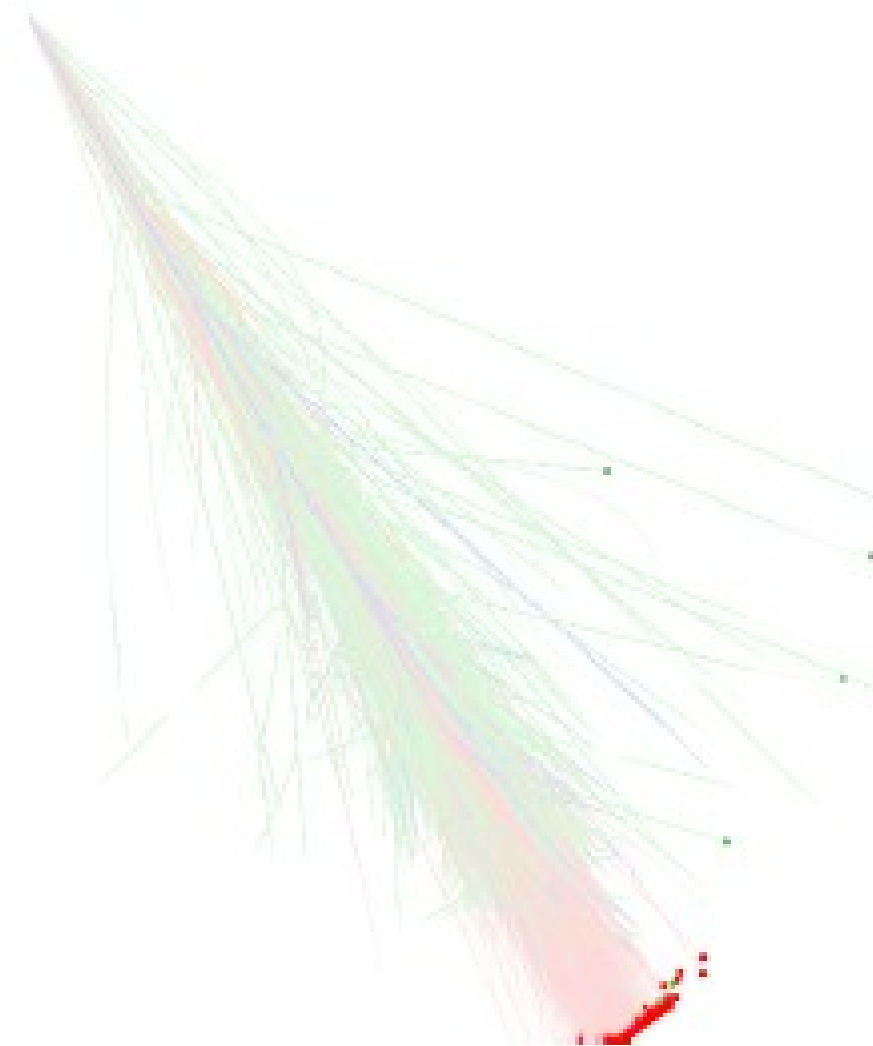
Nagy energián többféle ion is van az UHECR-ben
- 1 TeV fölött a CR csak 40%-a proton

Az eredeti ion vagy proton energiája mivé alakul?
- Elektronok és fotonok
- Müonok
- Kis energiájú hadronok

Honnan tudjuk az eredeti ion tömegét?
- A zápor maximumának mélysége, X_{\max}
- Müon tartalom

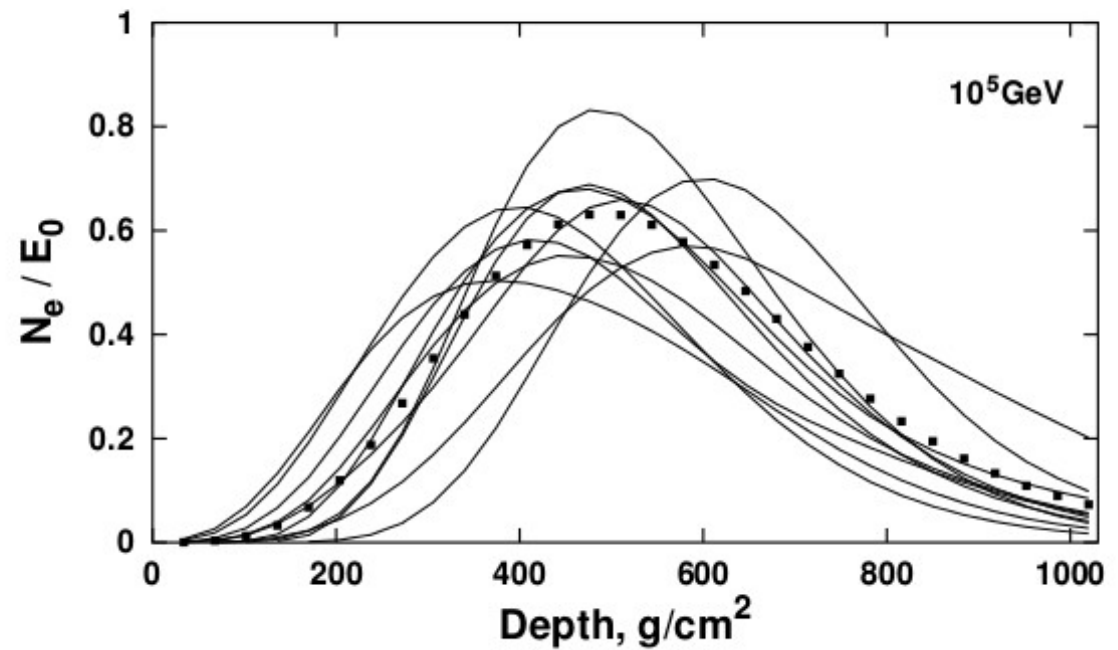
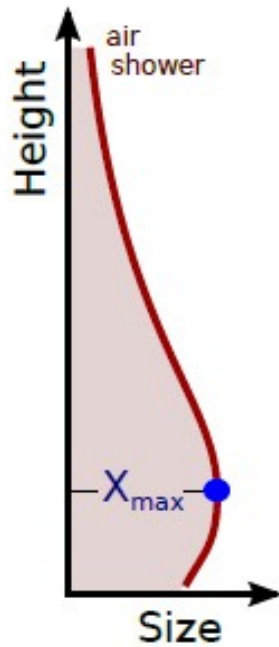
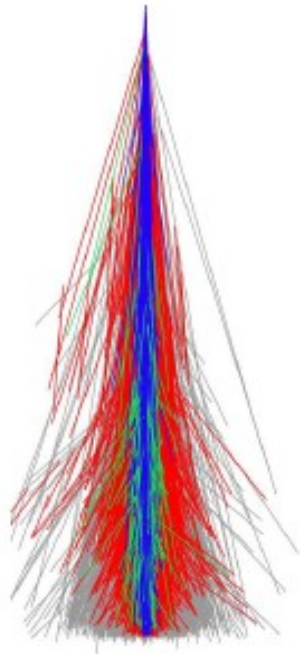
Precíz modellek nagyon fontosak
- Ütközőnyalábos kísérletek segítenek!

Kiterjedt kozmikus záporok: ultranagy energiájú kozmikus sugarak (UHECR)



Kozmikus zápor profilok

Szimulációból kapott eredmények:
nagy fluktuációk
az átlagot a pontok mutatják

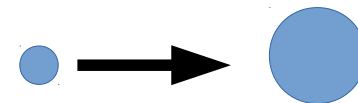


Részecskegyorsítók: segíthetnek a kozmikus sugárzás vizsgálatában?

A protonok energiája az LHC-ben:	6.5 TeV
A protonok száma az LHC-ben:	$\sim 3 \times 10^{14}$
A Földre érkező $E > 1$ TeV kozmikus protonok száma/sec:	$\sim 10^{14}$

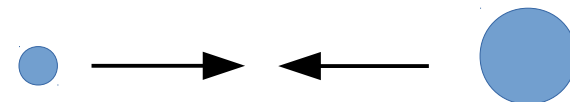
Azonos nagyságrendbe esnek!

UHECR:	10^6 TeV
Greisen-Zatsepin-Kuzmin limit:	5×10^7 TeV

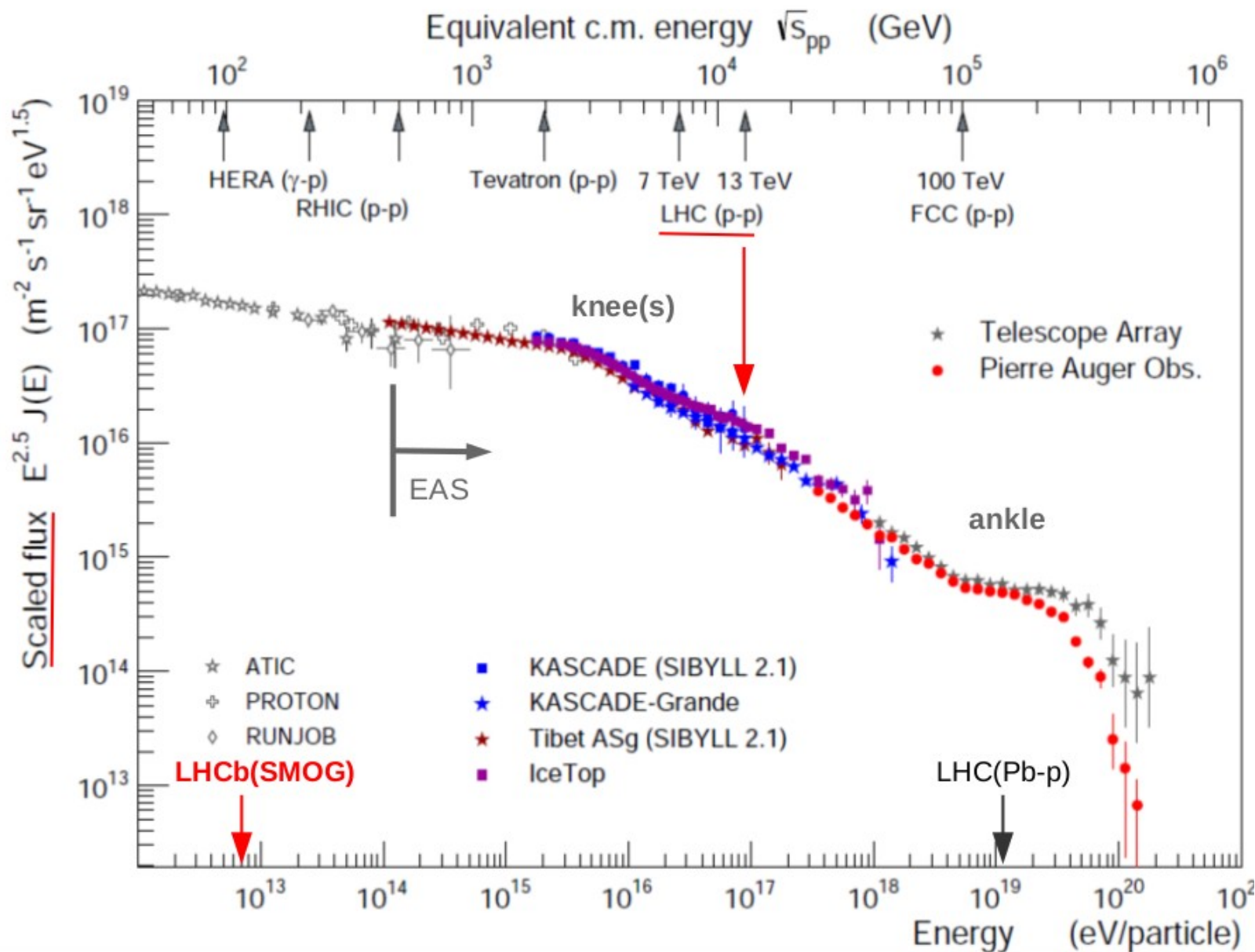


Ez átszámolva nukleon-nukleon tömegközépponti energiára:

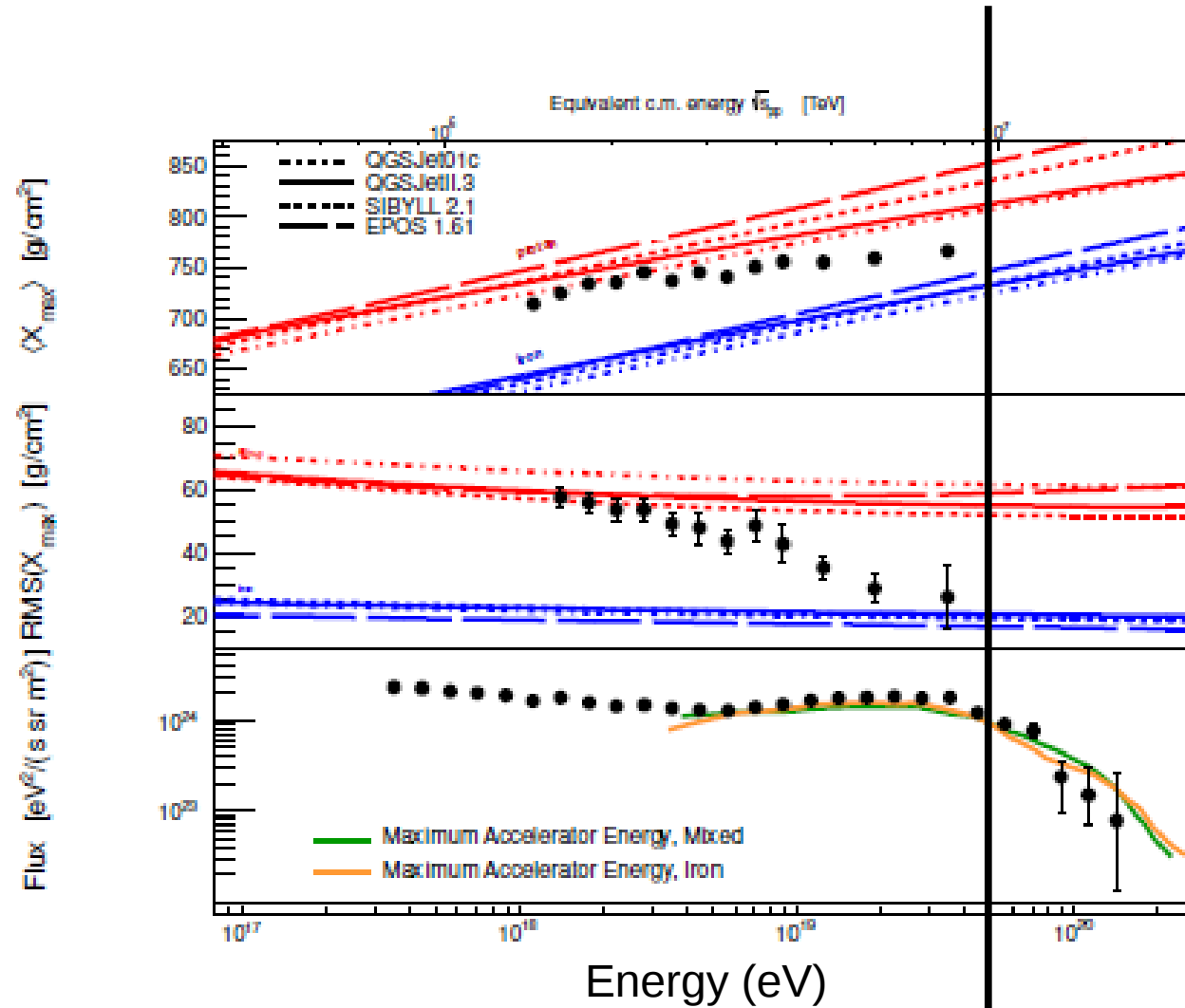
UHECR:	43 TeV
GZK limit:	306 TeV
LHC:	13 TeV
FCC (planned):	100 TeV



Kozmikus sugárzás energiaspektruma



Mi a kozmikus sugárzás forrása és természete?



GZK határ... (protonok)?

Közeli pontforrások?

Átmenet a galaktikus és extragalaktikus kozmikus sugárzás között?

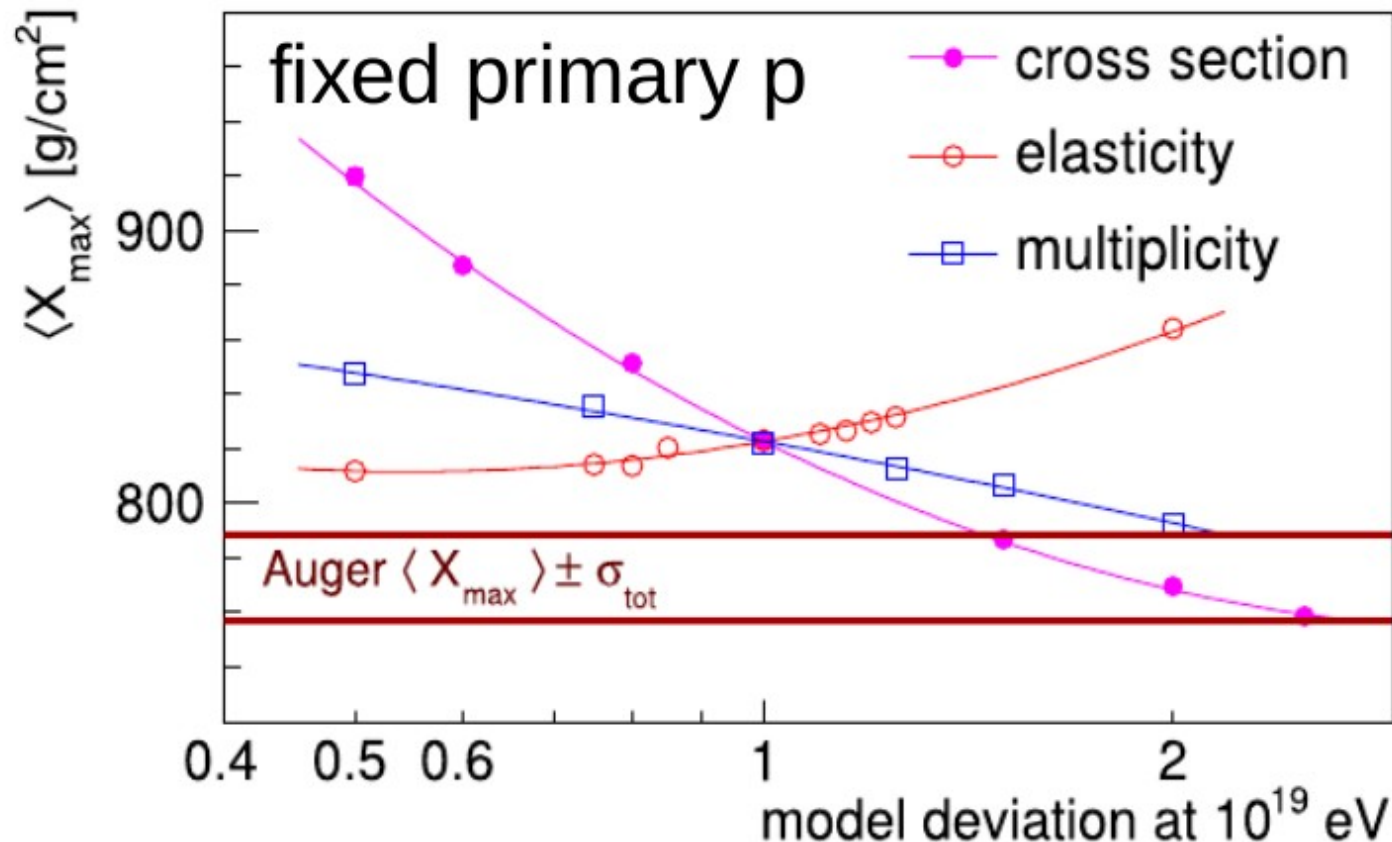
Mi az elemösszetétele a kozmikus sugárzásnak?
Fontos az energiaspektrum megértéséhez!

Kozmikus sugárzást leíró modellek

● Which model for CR ? (alphabetical order)

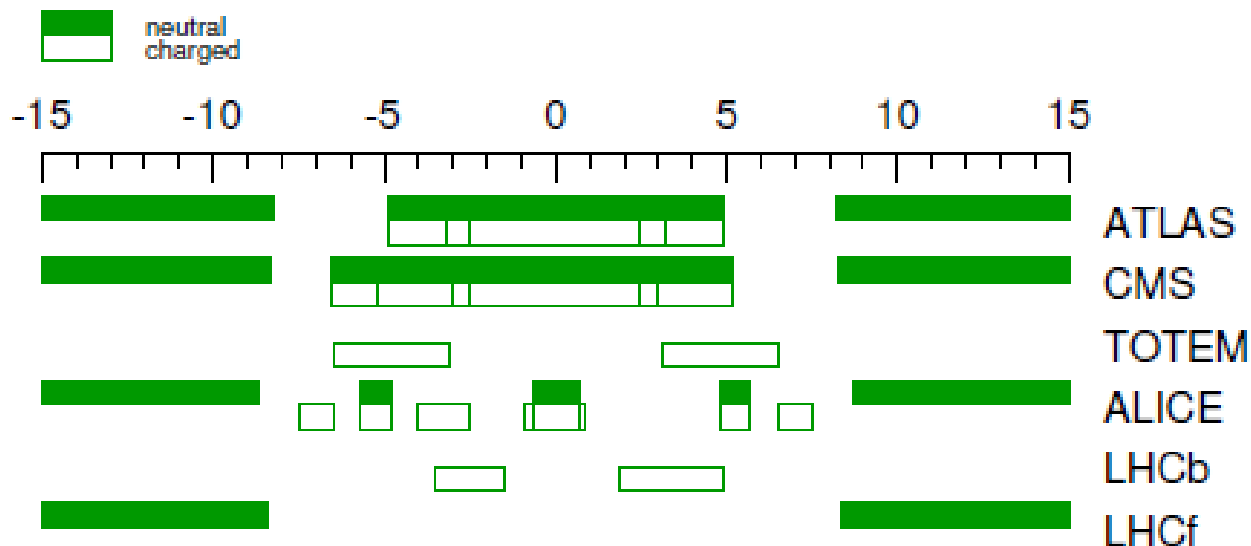
- **DPMJETIII.17-1** by S. Roesler, A. Fedynitch, R. Engel and J. Ranft
- **EPOS (1.99/LHC)** (from VENUS/NEXUS before) by H.J. Drescher, F. Liu, T. Pierog and K. Werner.
- **QGSJET** (01/II-03/II-04/III) by S. Ostapchenko (starting with N. Kalmykov)
- **Sibyll (2.1/2.3c)** by E-J Ahn, R. Engel, R.S. Fletcher, T.K. Gaisser, P. Lipari, F. Riehn, T. Stanev

Hadronikus kölcsönhatásokra való érzékenység



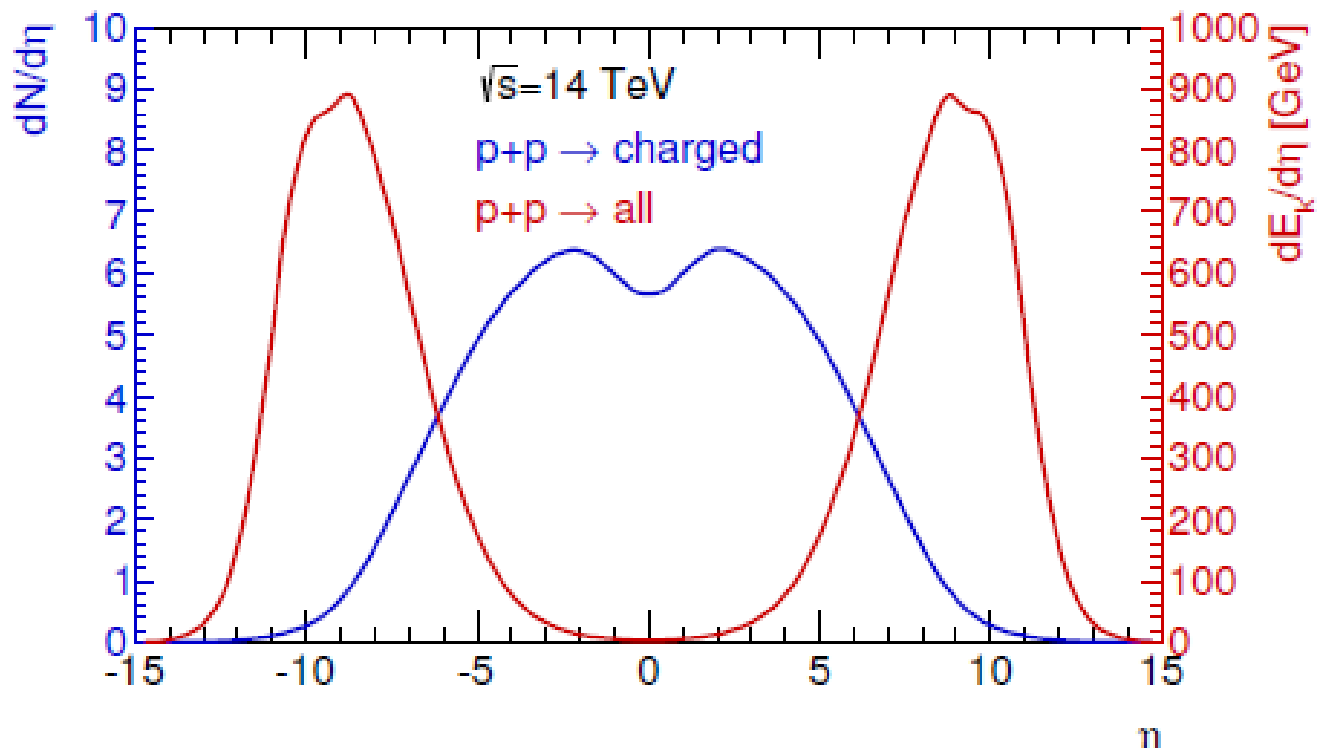
Releváns **paraméterek** a modellekben a kozmikus záporokra vonatkozóan:
Hatáskeresztmetszetek (p+A, pion+A, K+A), kozmikus sugár tömege és energiája, inelzicitás, multiplicitás, töltésarány, barion keltés

Az LHC kísérletek geometriai lefedettsége

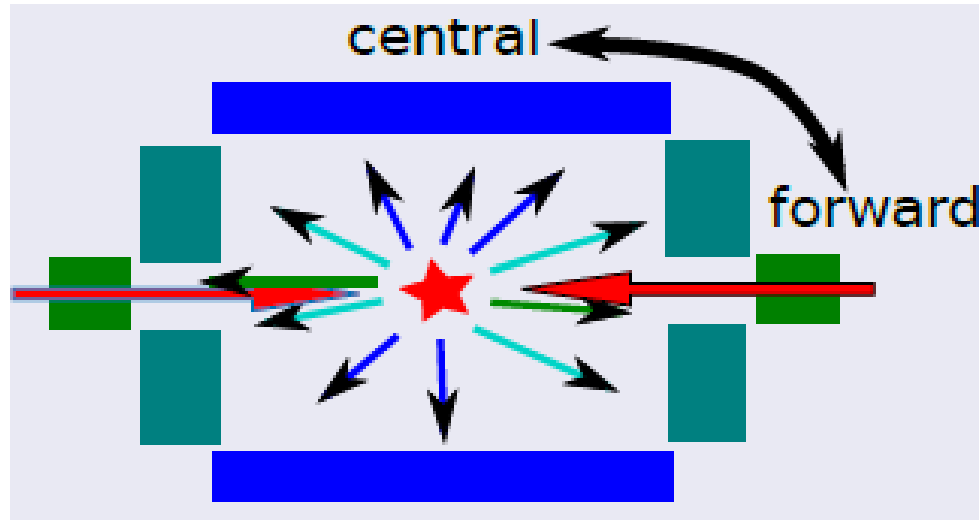


$$\eta = -\ln \tan(\Theta/2)$$

Θ a nyalábbal bezárt szög



A berendezések szögtartománya (CMS)

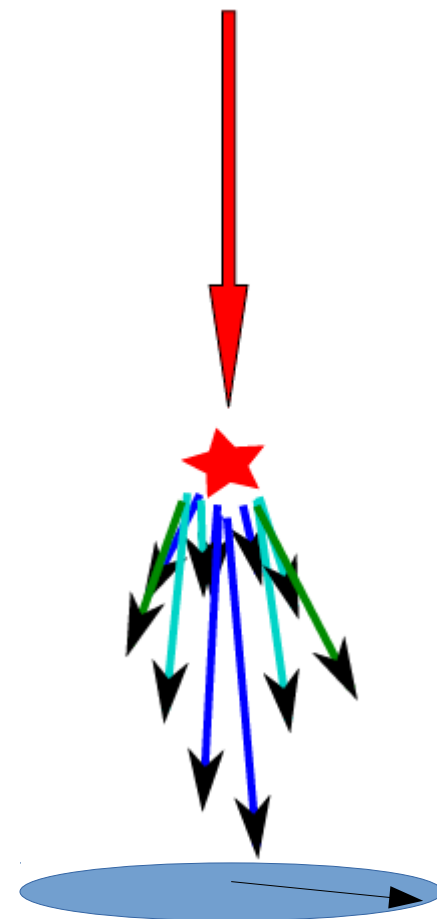
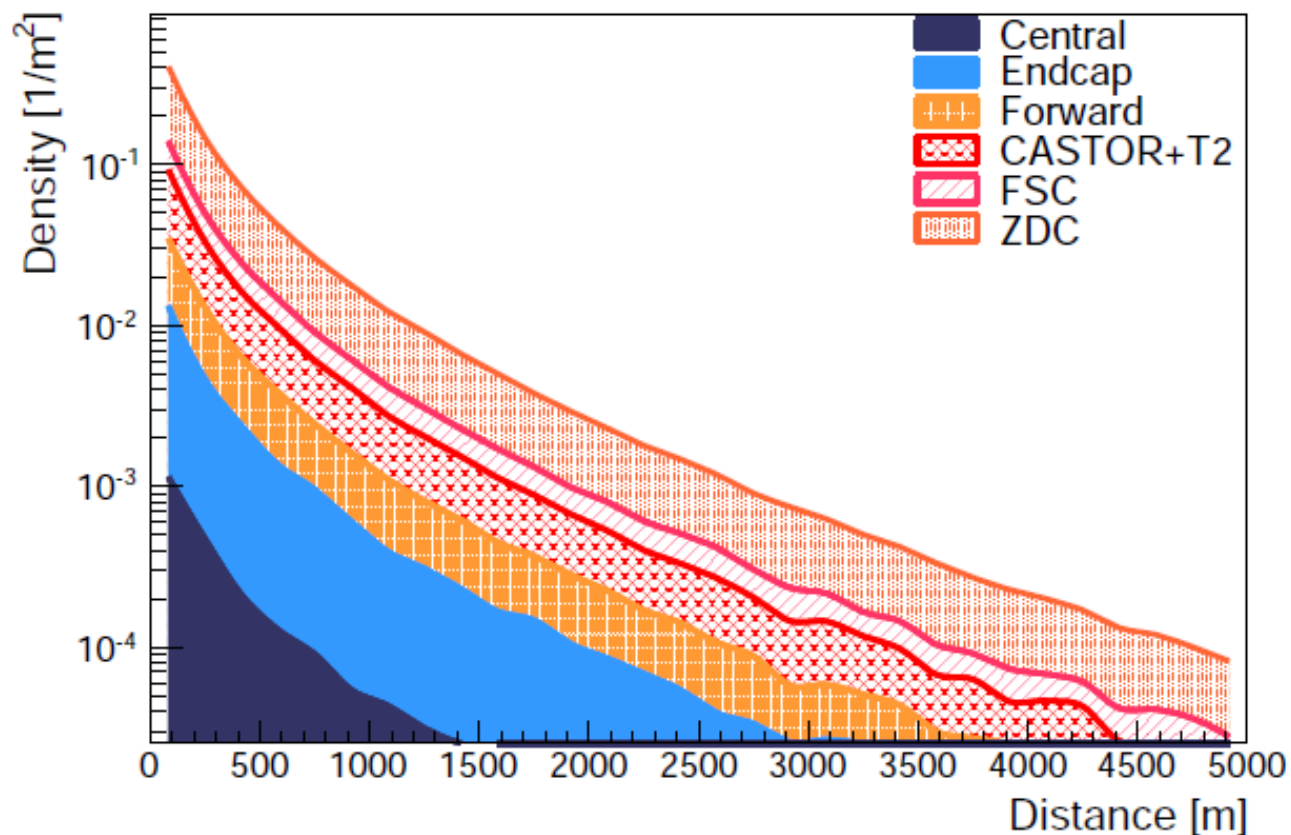


- $|\eta| < 1$: centrális tartomány
- $1 < |\eta| < 3.5$: végsapka tartomány
- $3 < |\eta| < 5$: előremenő tartomány, HF kaloriméter
- $5 < |\eta| < 6.6$: CASTOR kaloriméter és TOTEM T2
- $6.6 < |\eta| < 8$: Forward Scintillator Counters
- $|\eta| > 8$: Nullaszögű kaloriméter, LHCf

Mennyire relevánsak ezek az LHC detektorok a kozmikus sugárzás szempontjából?

Szimuláljuk a záporok komponenseit egyenként!

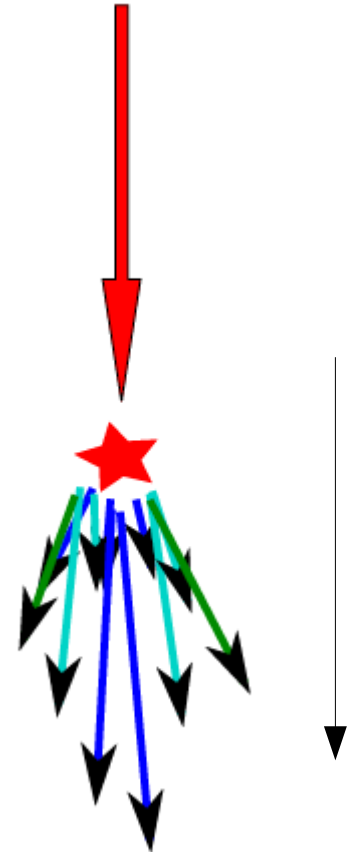
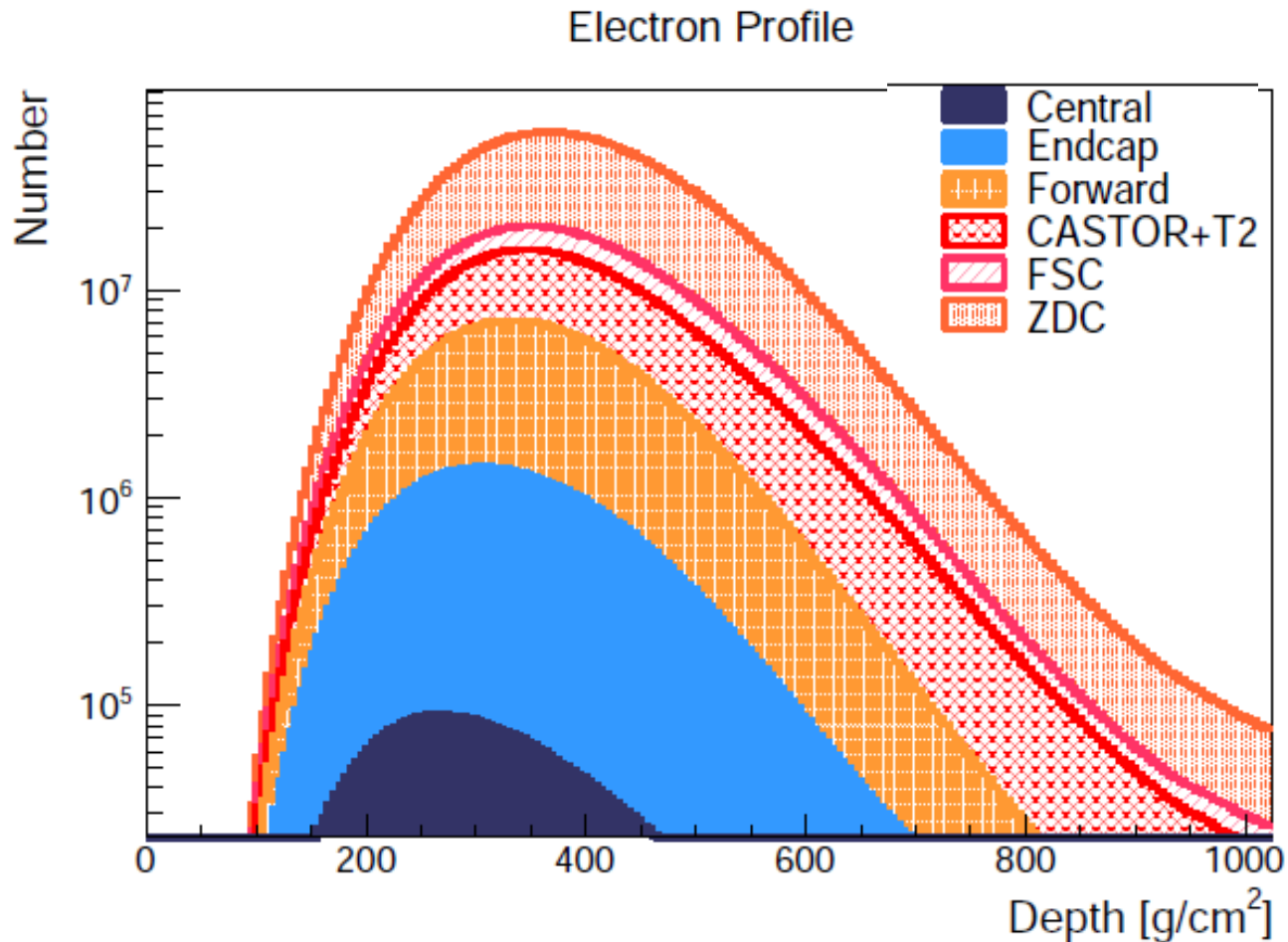
Vízszintes irányú müonsűrűség a Föld felszínén



A kis szögben elhelyezett detektorok fontosak a részecskekeltés méréséhez – a kozmikus sugárzásra nézve releváns tartományban

Ábra: Ralf Ulrich

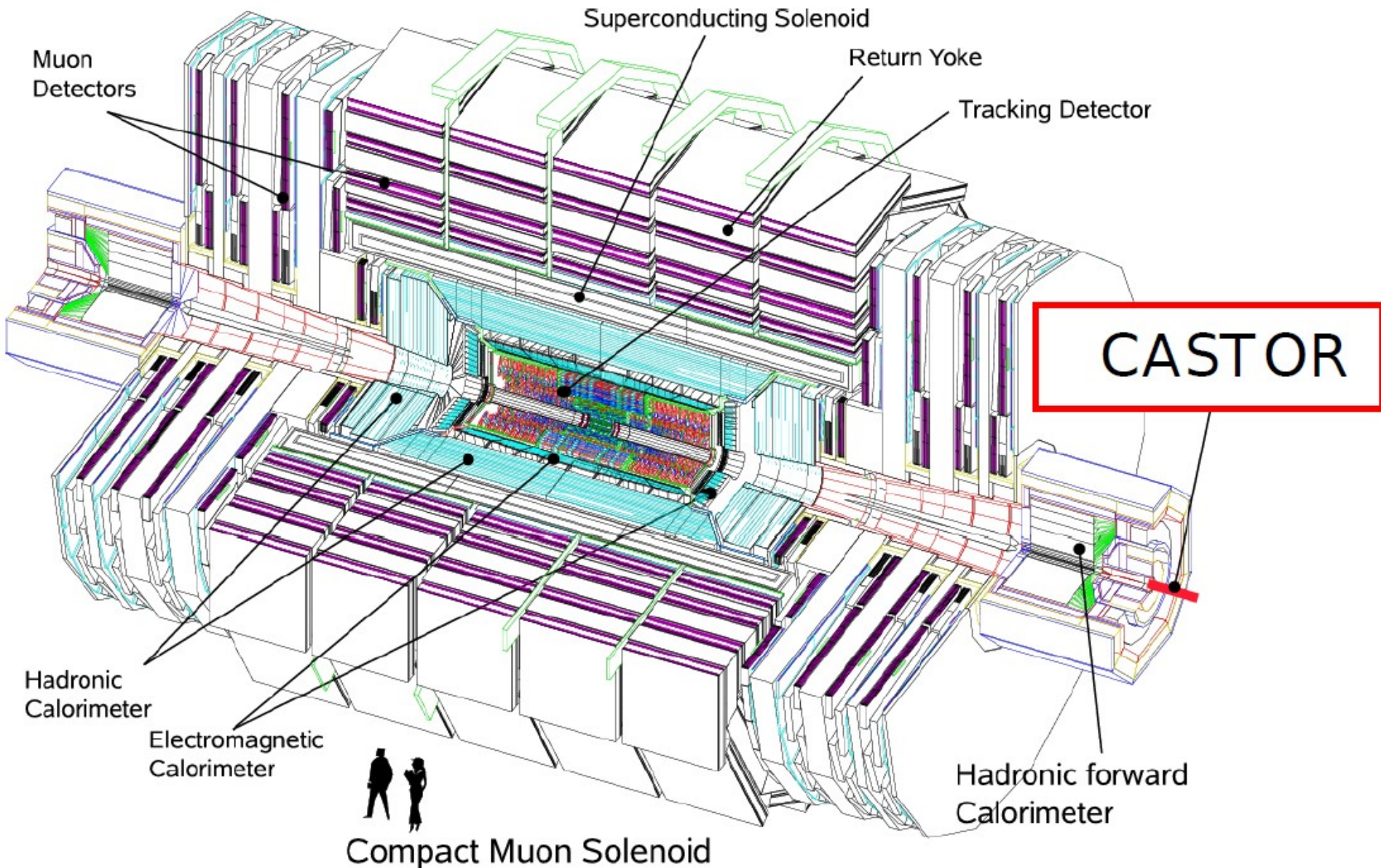
Hosszirányú zápor profil (átlag) elektronokra



A kis szögben elhelyezett detektorok fontosak a részecskekeltés méréséhez – a kozmikus sugárzásra nézve releváns tartományban

Ábra: Ralf Ulrich

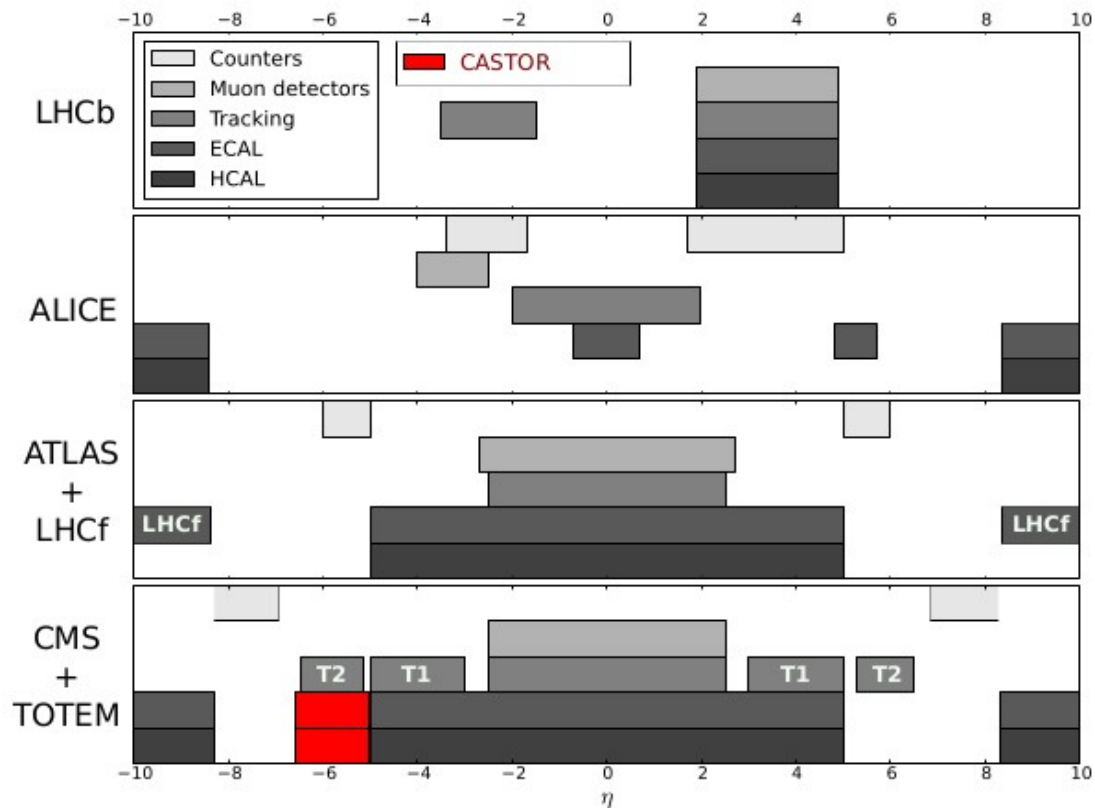
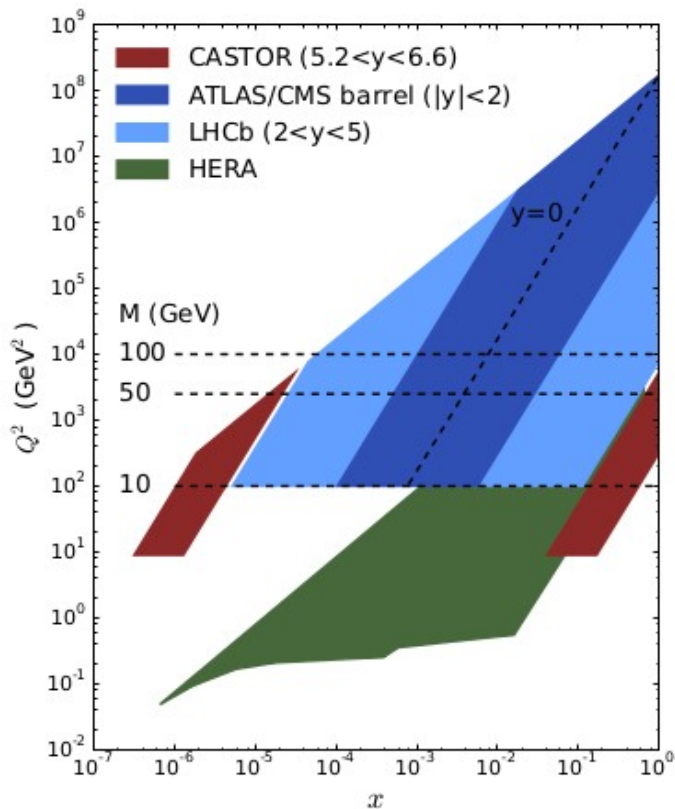
A CMS kísérlet a CASTOR kaloriméterrel



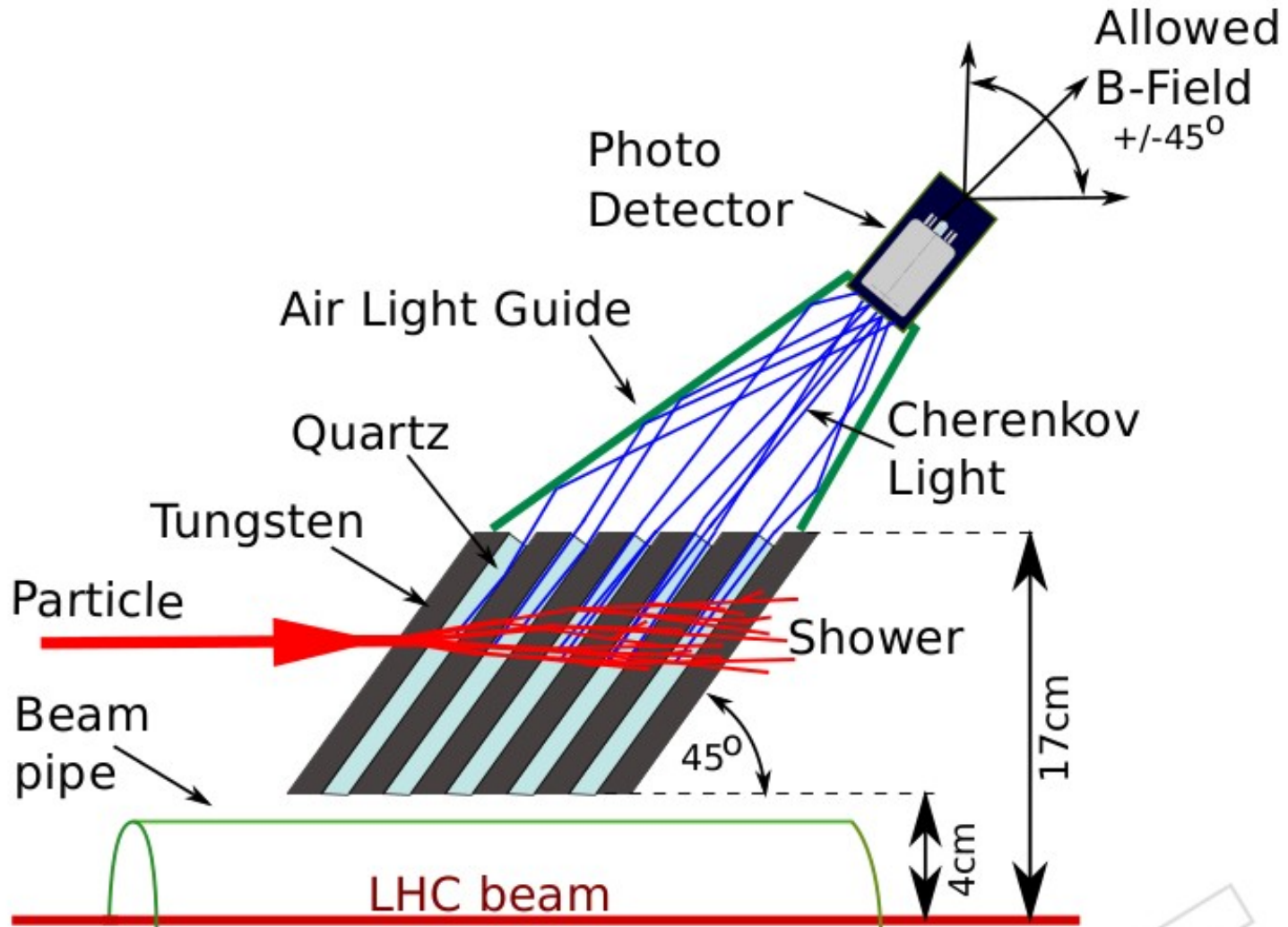
CMS és CASTOR a kísérleti üregben



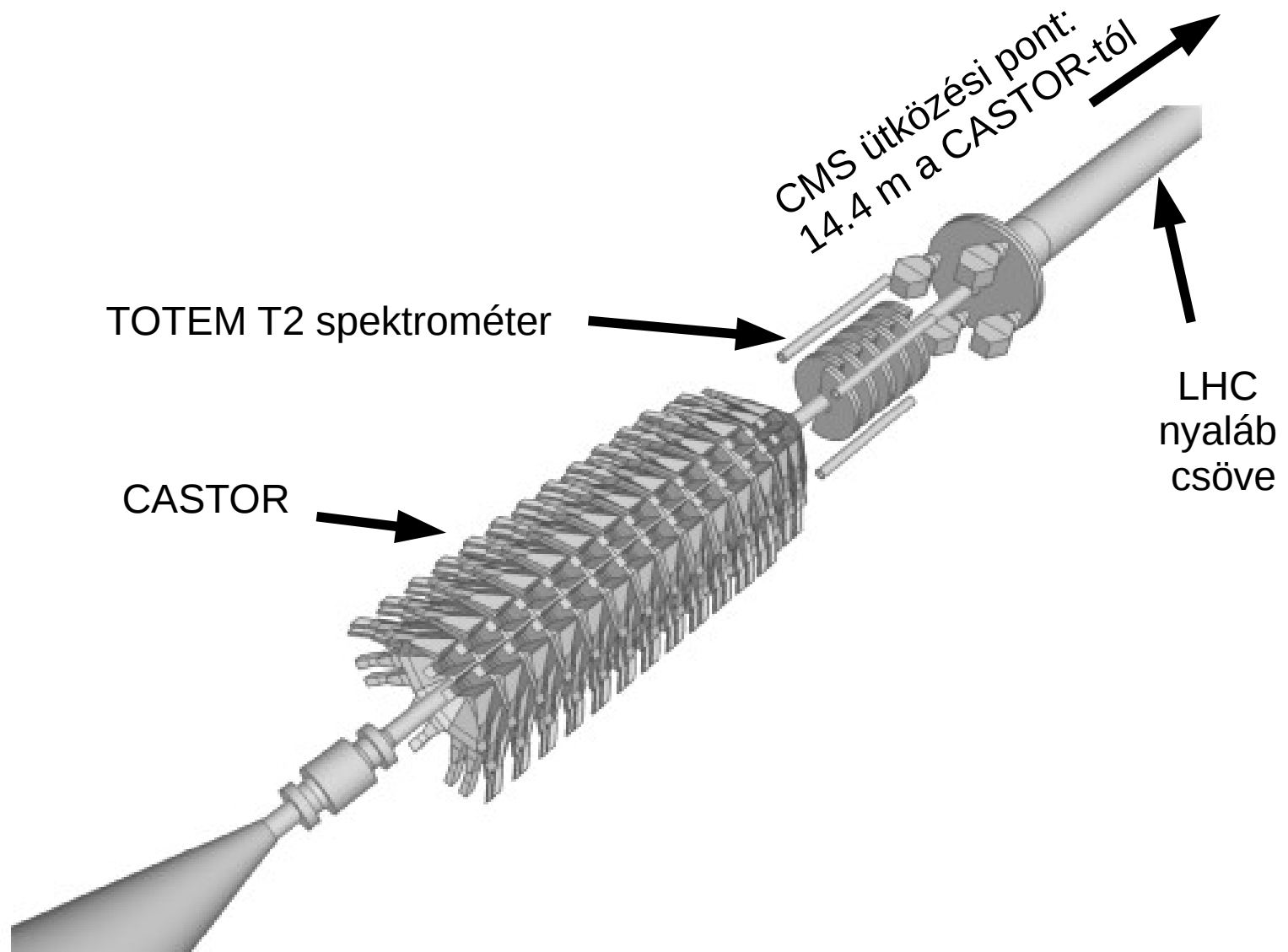
A CASTOR által lefedett térrész



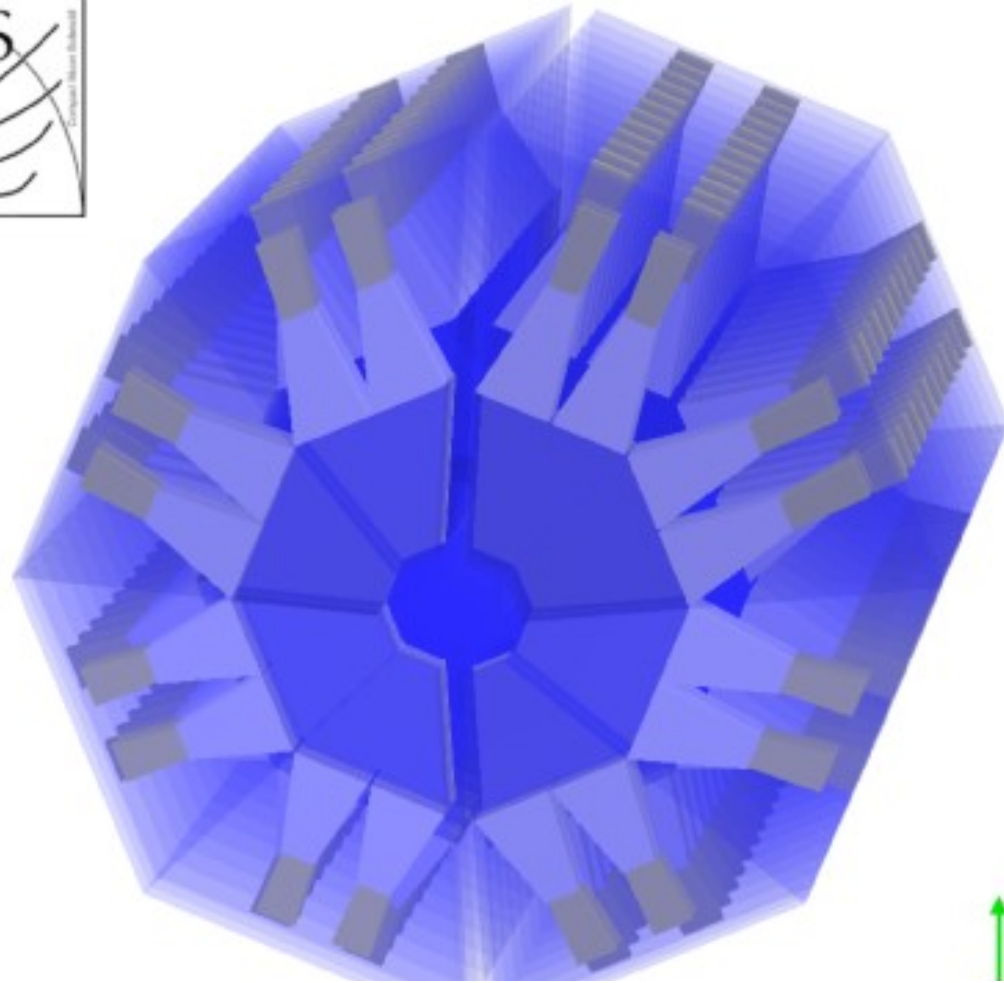
A CASTOR detektor



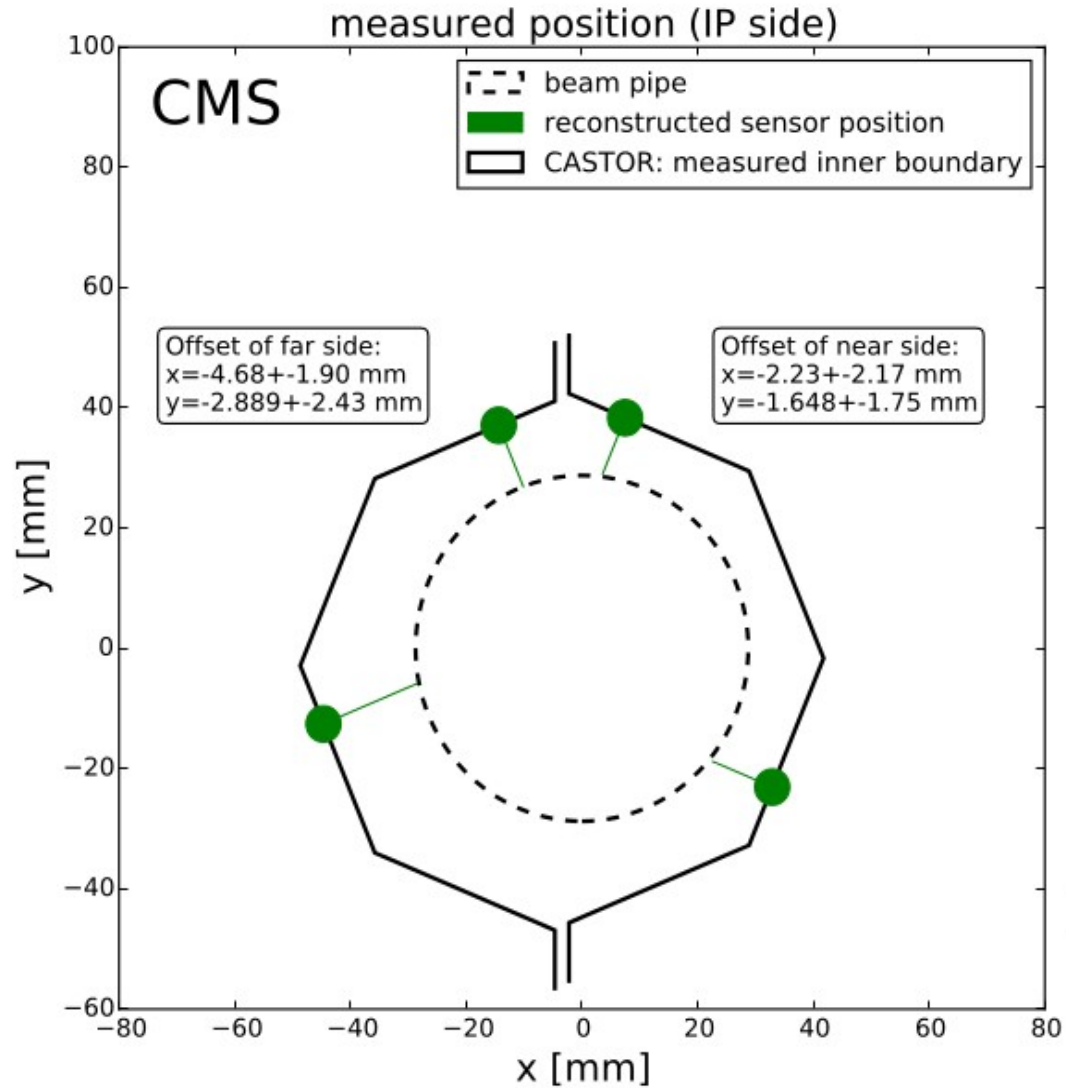
A CASTOR kaloriméter környezete



A három-dimenziós modell a pozíciómérés után



CASTOR: pozíció mérés eredménye

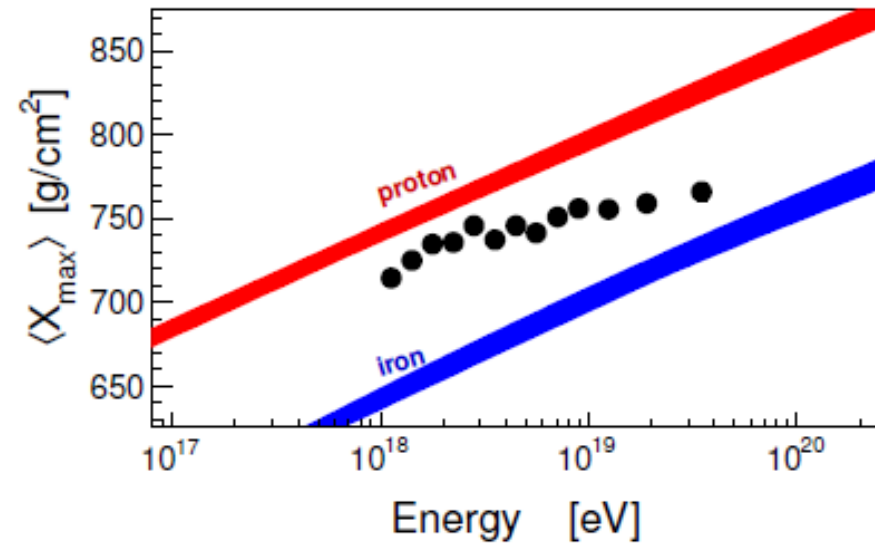
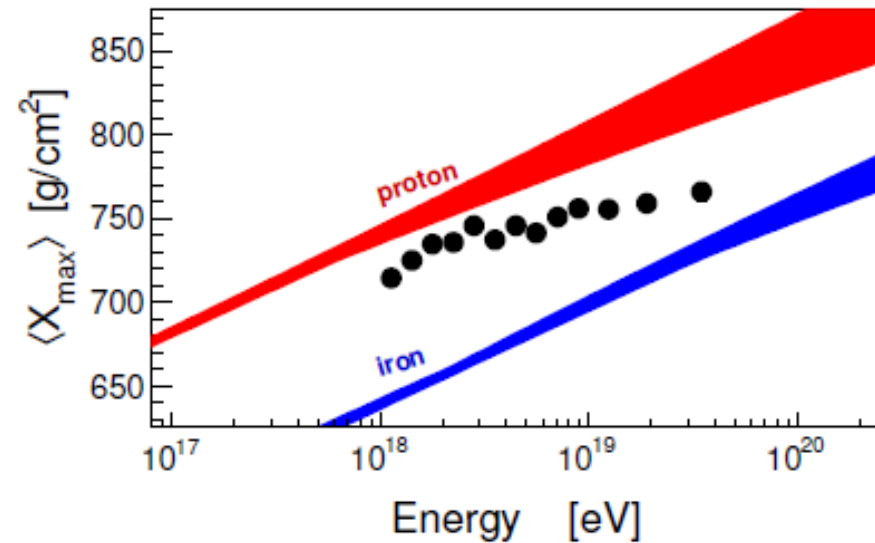


Model hangolás az LHC adatokhoz: $\langle X_{\max} \rangle$ jóslatok

EPOS 1.99
QGSJetII.3



EPOS LHC
QGSJetII.4

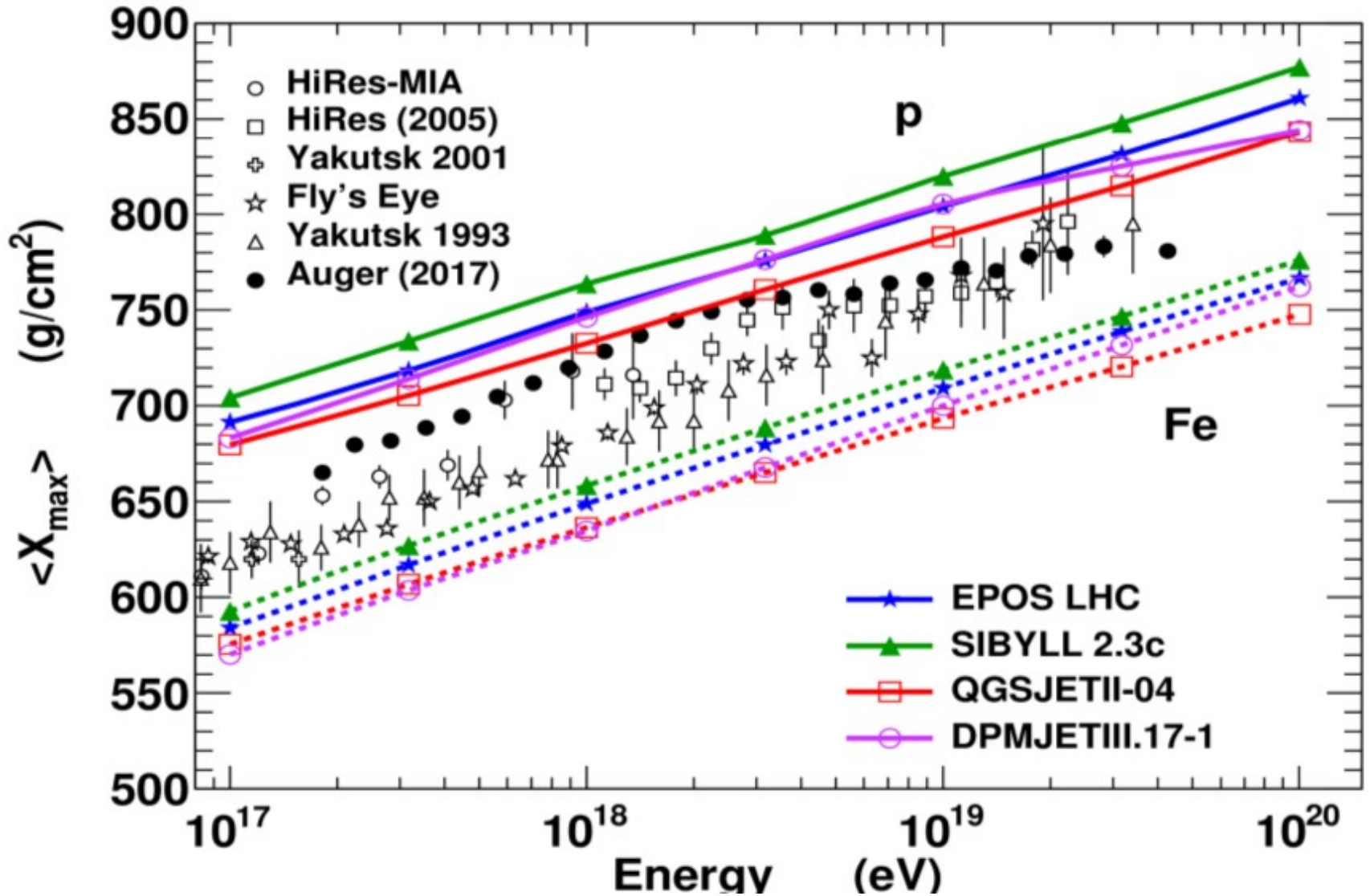


Hangolás:

Továbbfejlesztett modell jóslatok mindenféle ionokra

7 TeV-es LHC adatokat használtunk, de csak a centrális régióban

Model hangolás az LHC adatokhoz: $\langle X_{\max} \rangle$ jóslatok

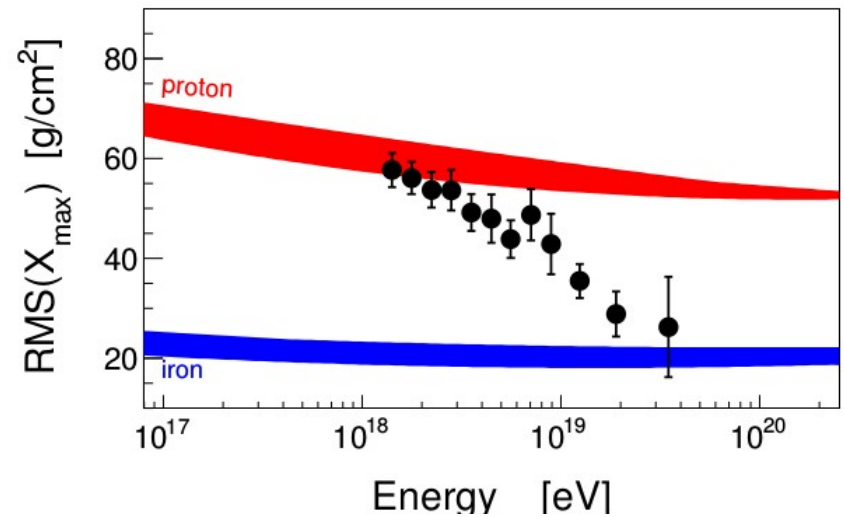
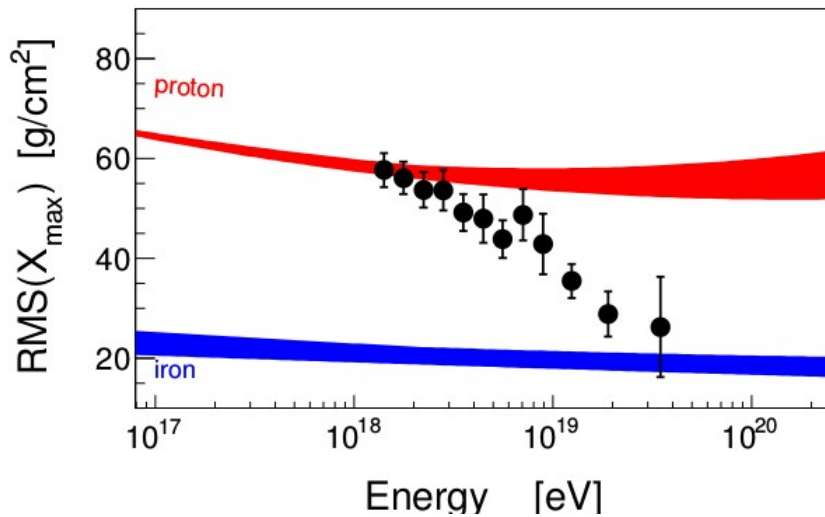


Jóslatok a $\langle X_{\max} \rangle$ fluktuációira

EPOS 1.99
QGSJetII.3



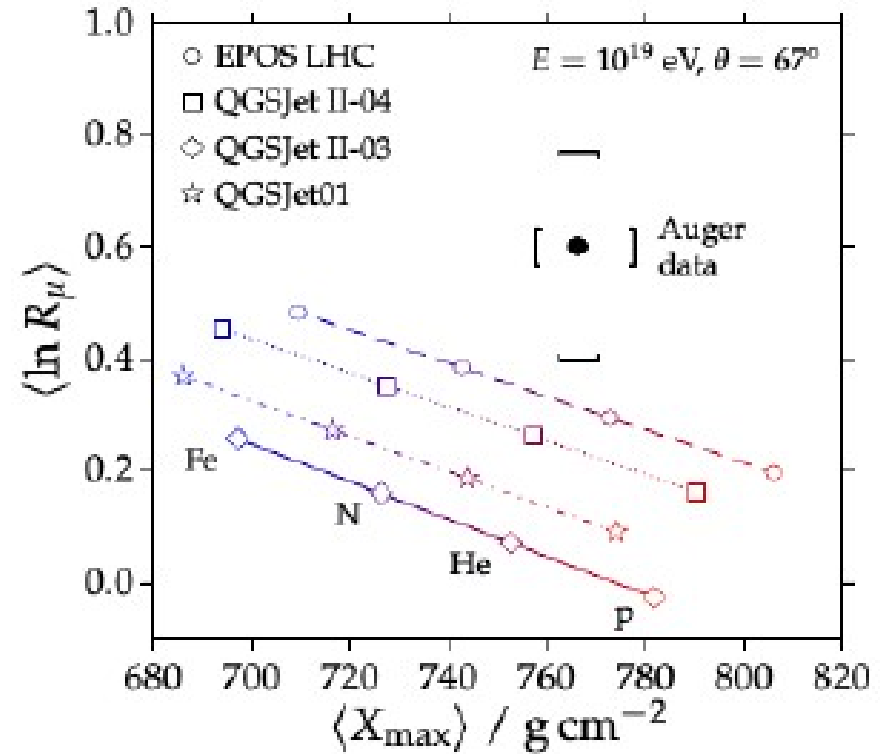
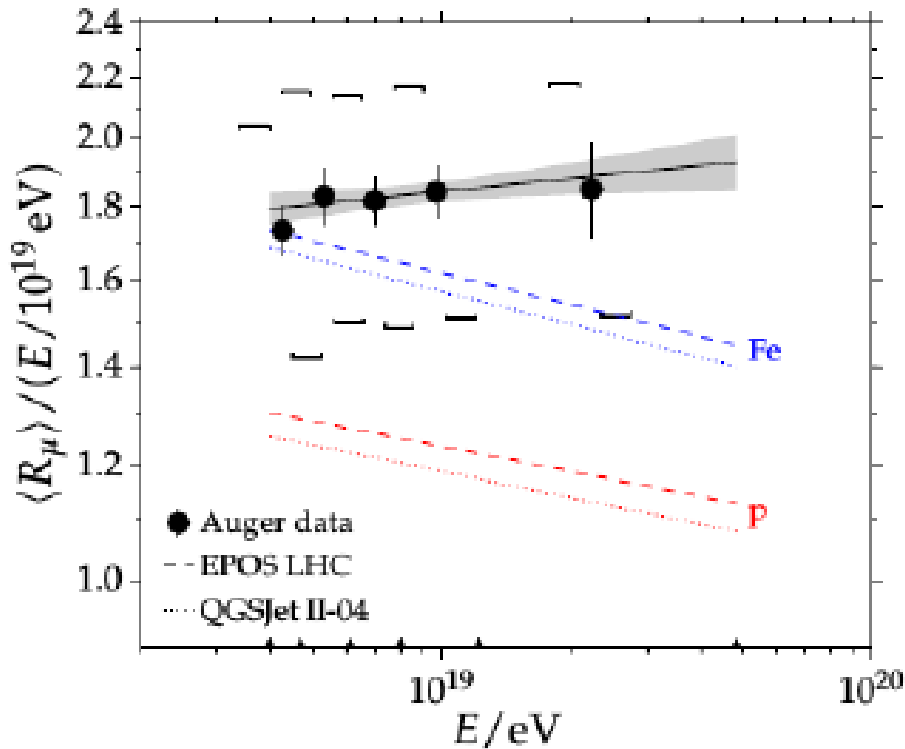
EPOS LHC
QGSJetII.4



Hangolás: javult a nagyenergiás pontosság, de romlott kis energiánál

Tényleg jobb megértést tükröz?

Kozmikus záporok müontartalma (Föld felszínén)



Phys. Rev. D 91, 032003 (2015)

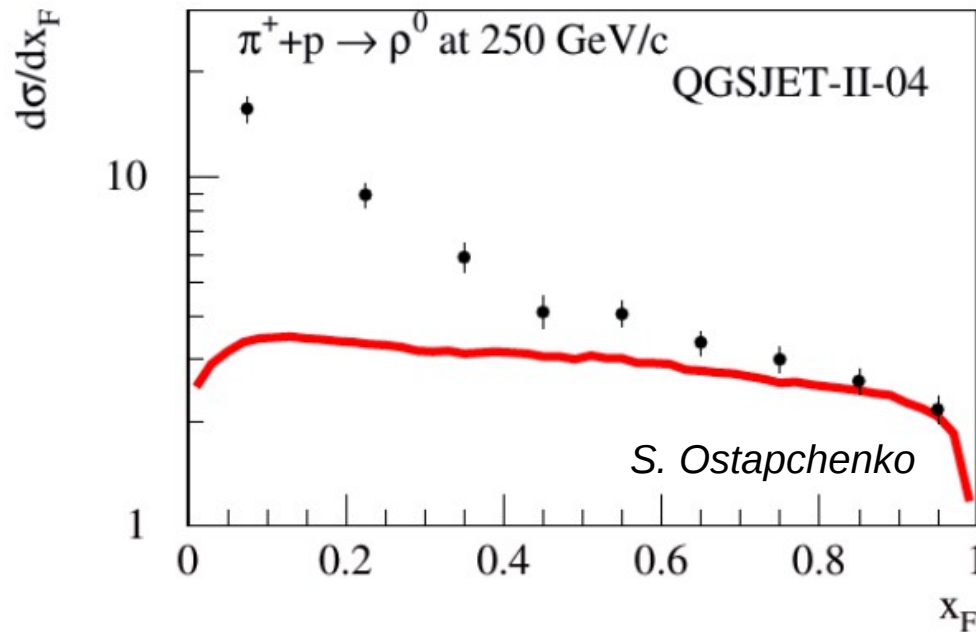
A müonok száma függ:
 Hadronikus kölcsönhatásoktól
 Multiplicitástól
 Töltésaránytól
 Barion-antibarion keltéstől

Müon **deficit** van a modellekben!
 Pedig a kozmikus sugárzás
 összetételét már figyelembe vettük!

Valahogy a kölcsönhatások leírásával
 lehet a baj...

Előremutató ρ^0 keltés, QGSJetII.3 \rightarrow 4

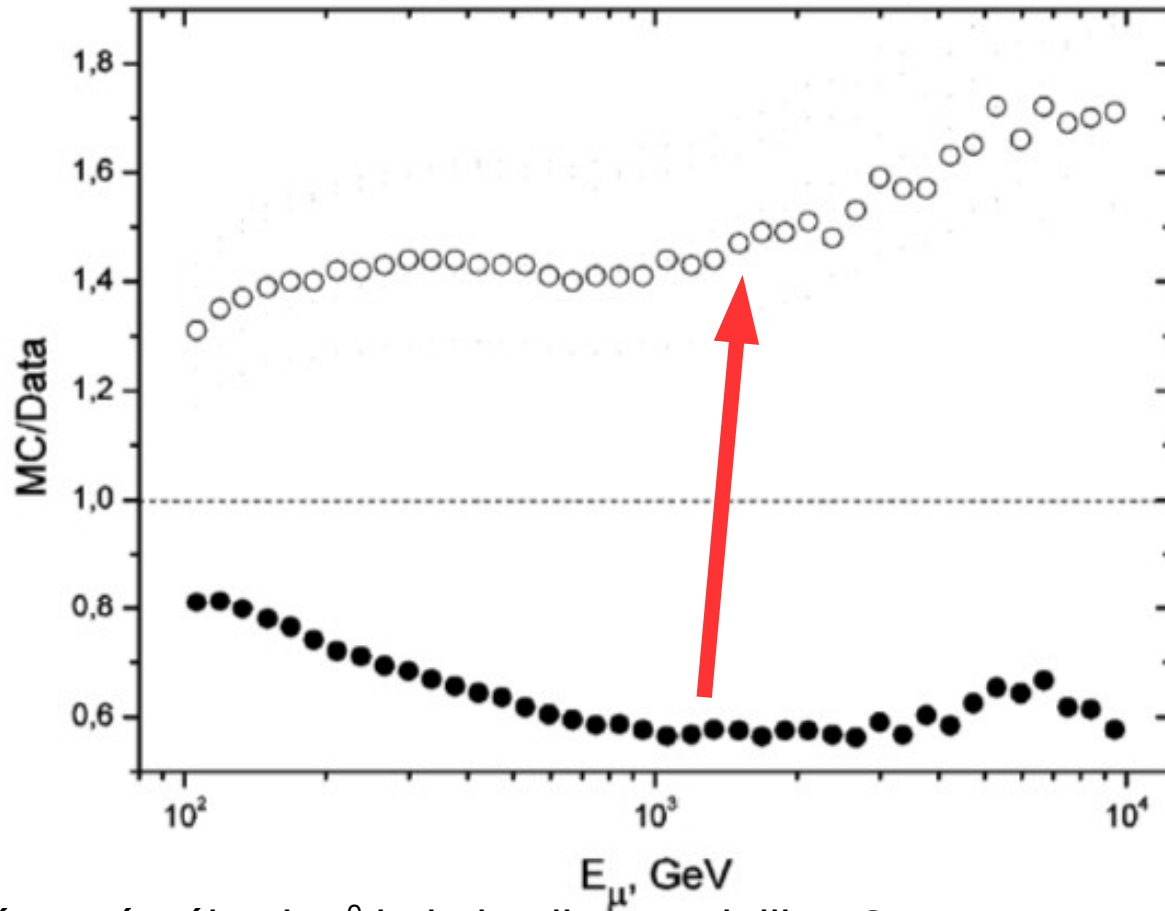
Töltéscsere, müonok keletkezésében fontos



Előremutató ρ^0 keltés, QGSJetII.4

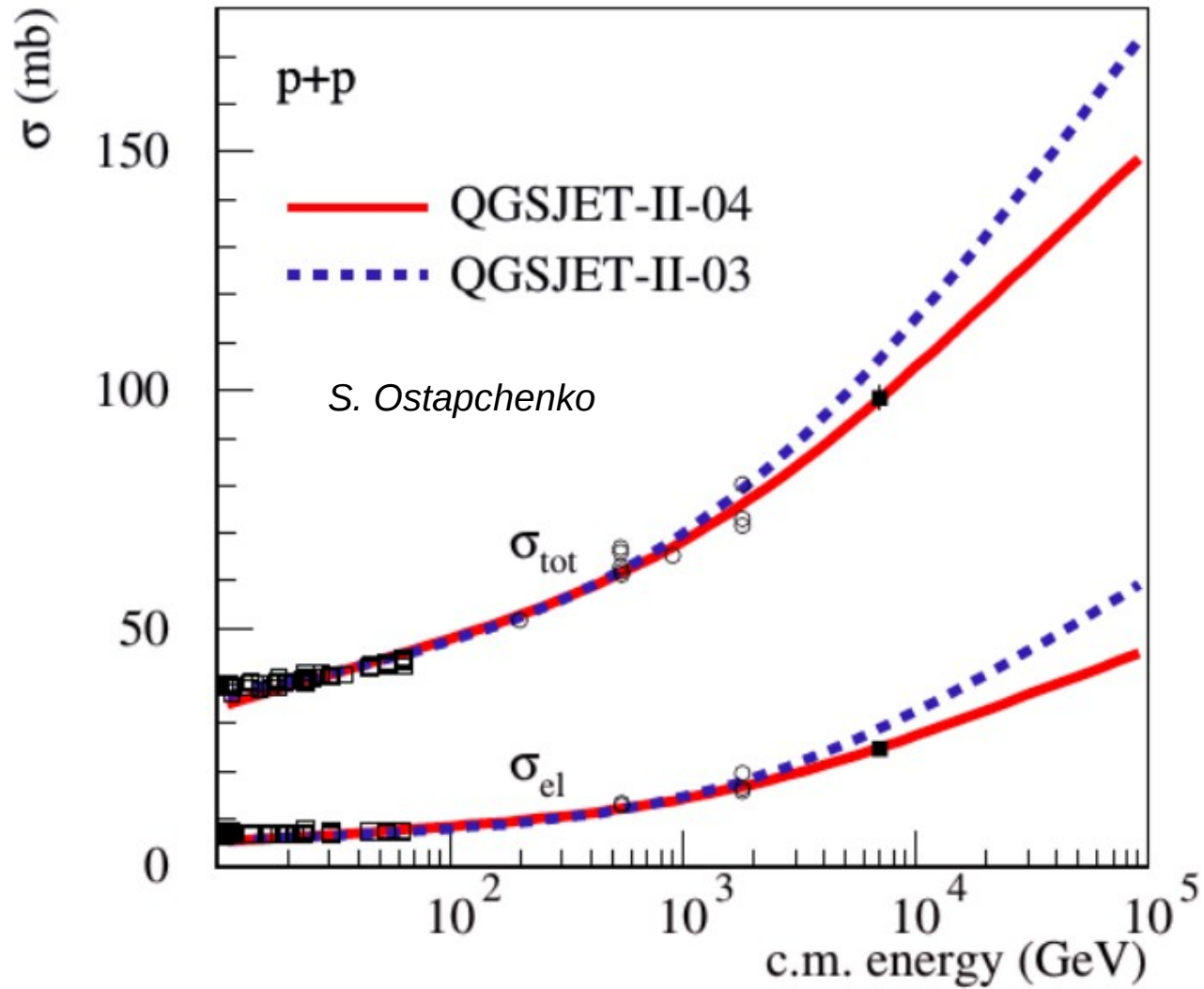
Atmoszférikus müonfluxus jóslása

MC/Data: ● QGSJET II-03, ○ QGSJET II-04



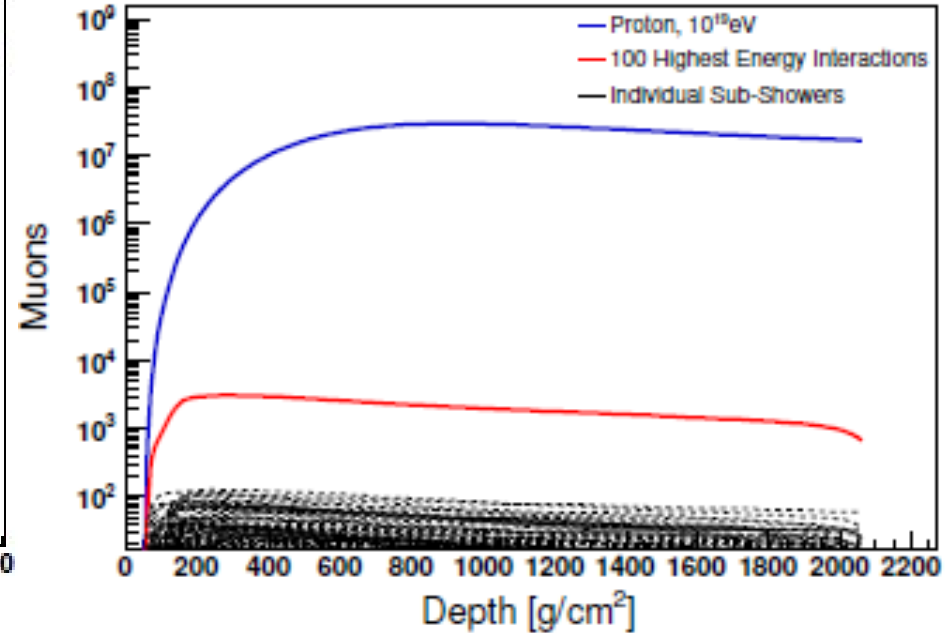
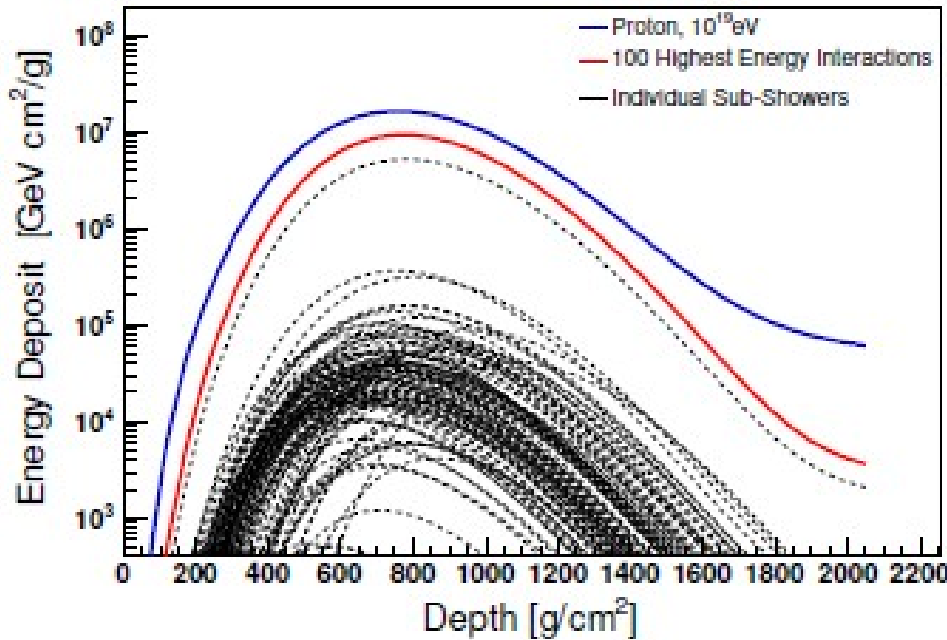
Lehet hogy így már túl sok ρ^0 keletkezik a modellben?

Proton-proton hatáskeresztmetszet



Proton-levegő hatáskeresztmetszet fontos a kozmikus záporok modellezéséhez

Kölcsönhatások fizikájára való érzékenység



A modelleknél kell hogy írjanak egy széles energiatartományt, messze a gyorsító energiája fölött is.
Extrapoláció a kisszögű térrészbe

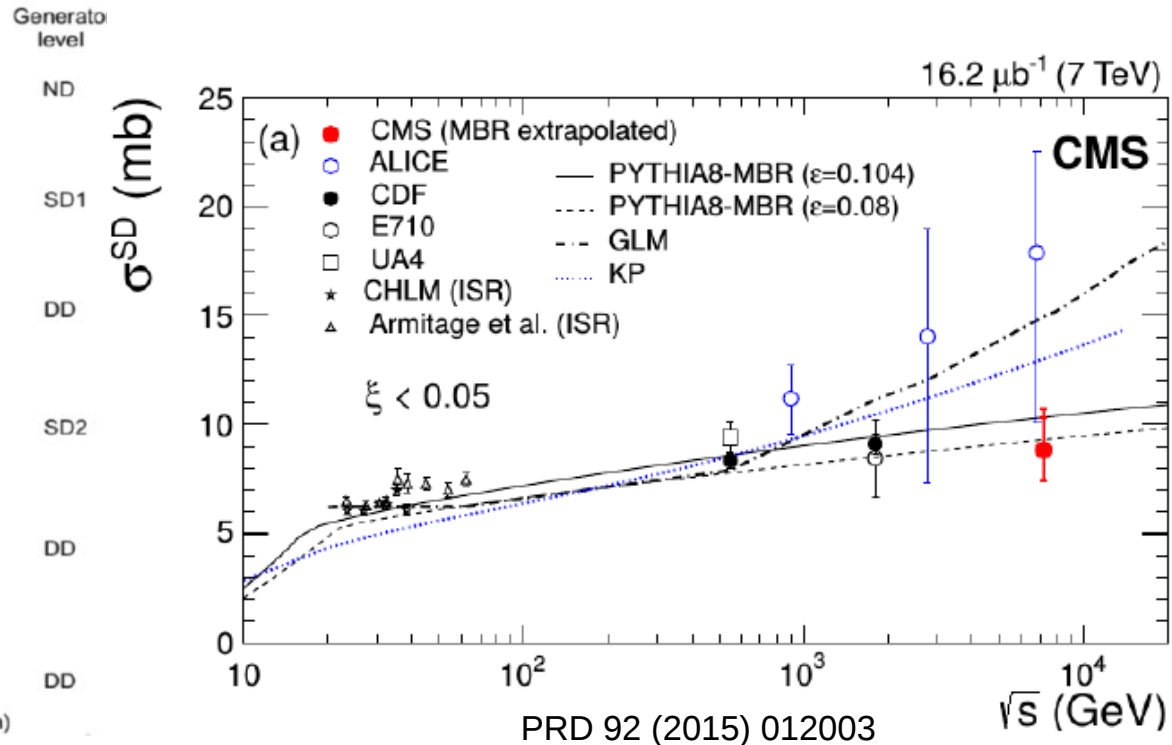
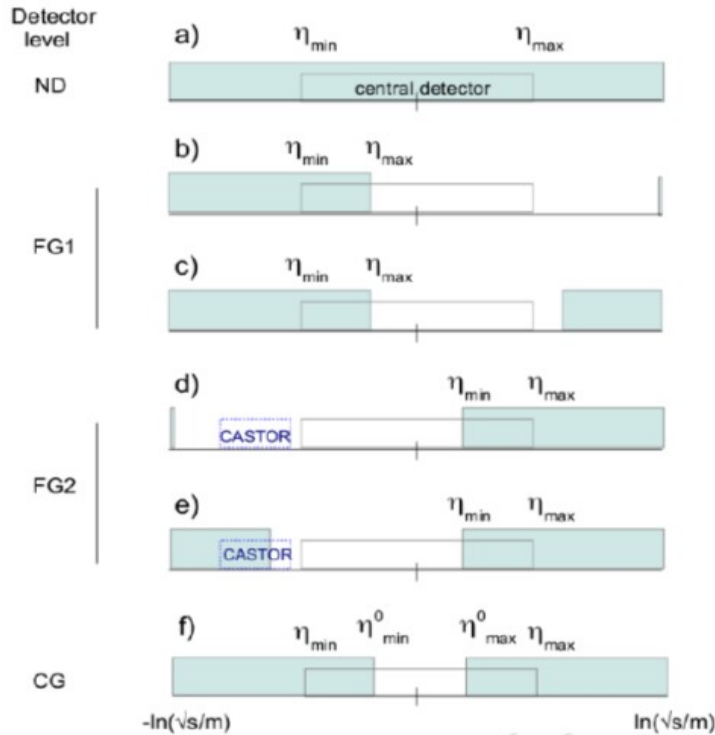
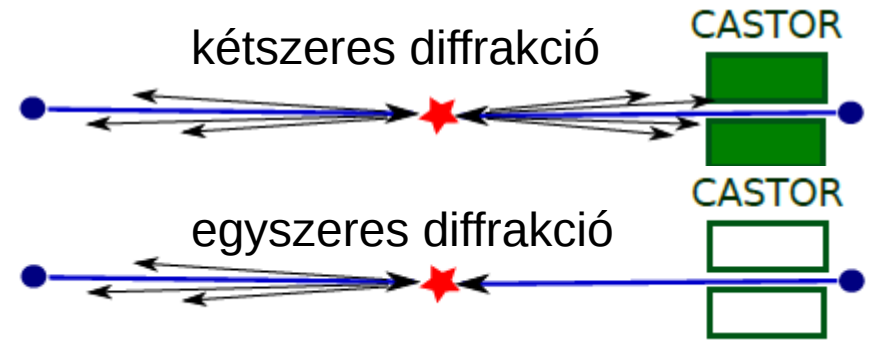
Ezek különféleképpen befolyásolják a záporok tulajdonságait:

X_{max} nagyon nagy energiájú ütközések

Müonok kis energiájú ütközésekből

Egyszeres diffrakció (kis tömeg) a CASTOR-ral (CMS)

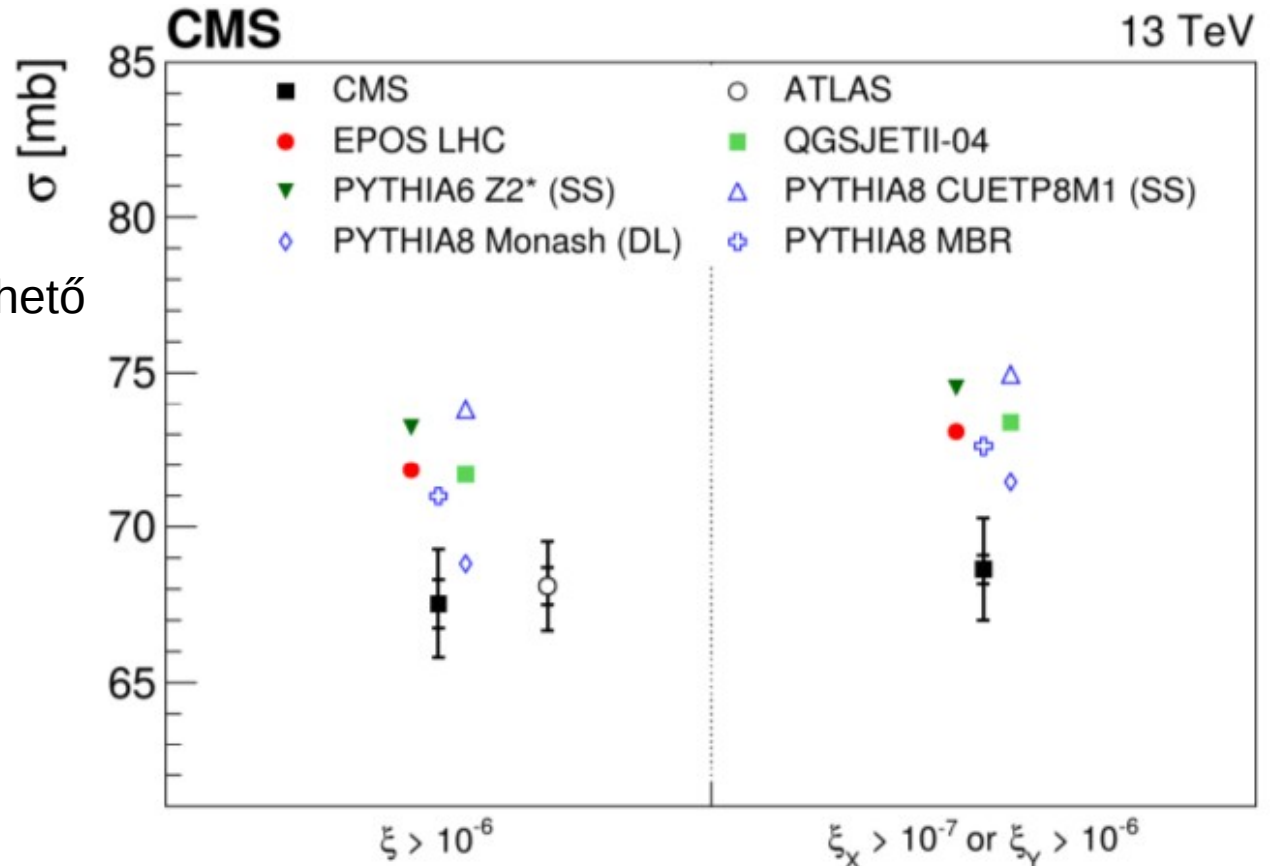
Egyszeres és kétszeres diffrakció szétválasztható a CASTOR kaloriméterrel



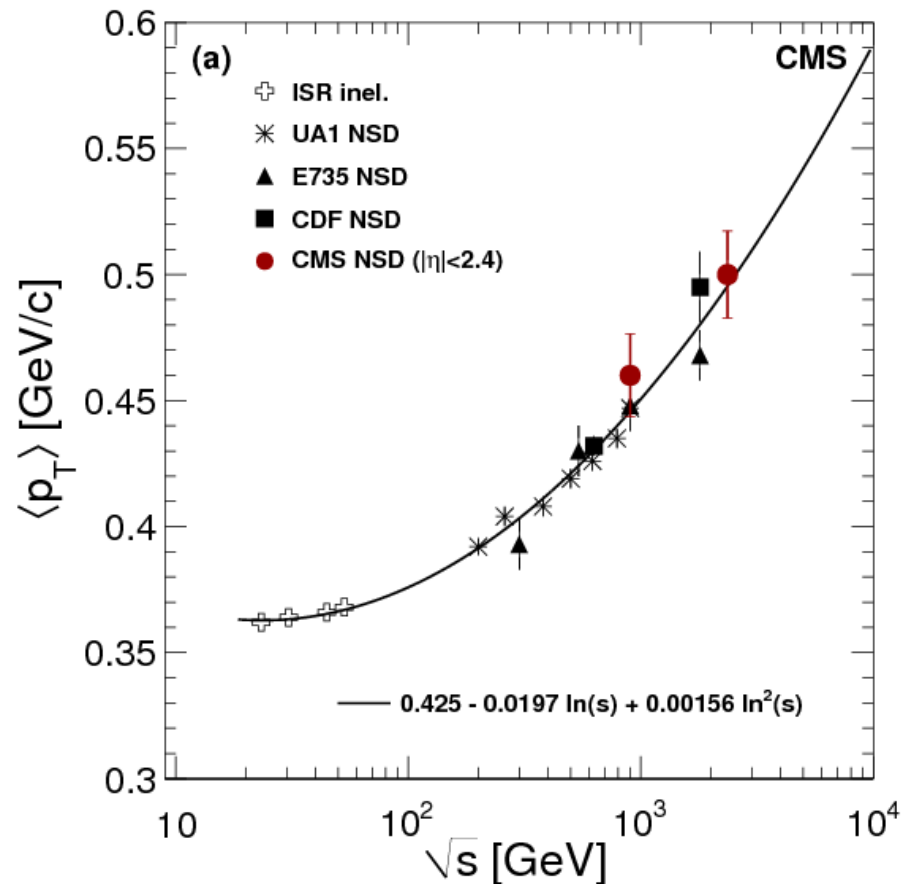
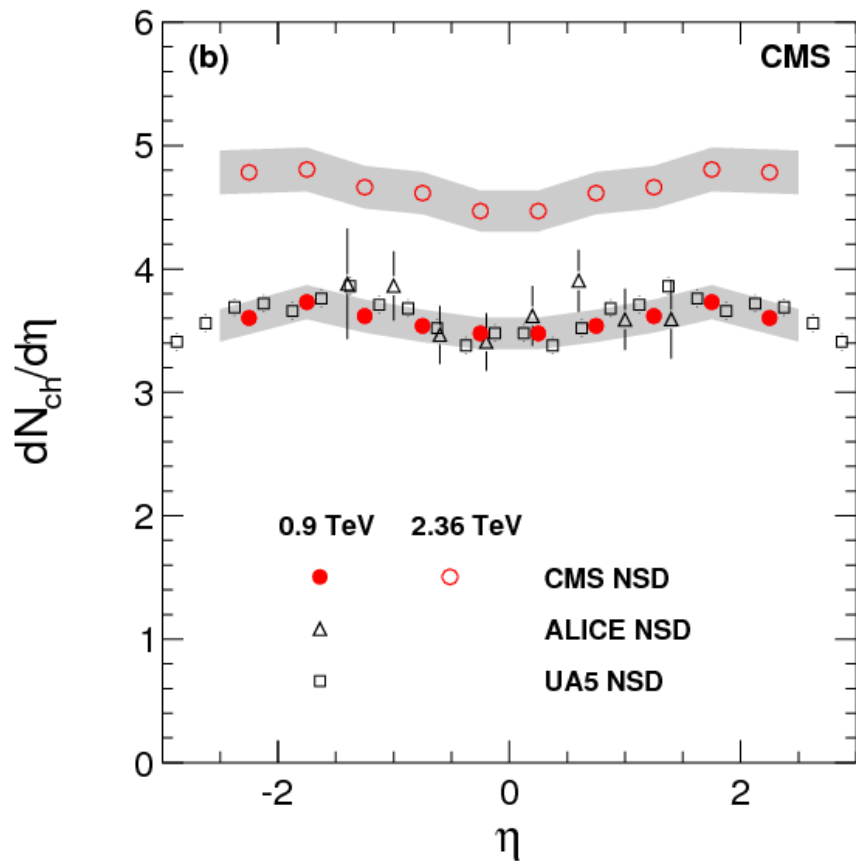
Rugalmatlan hatáskeresztmetszet 13 TeV-en (CMS)

Nagyon jó lefedettség
a CASTOR-nak köszönhető

A modellek túlbecslik
az adatokat

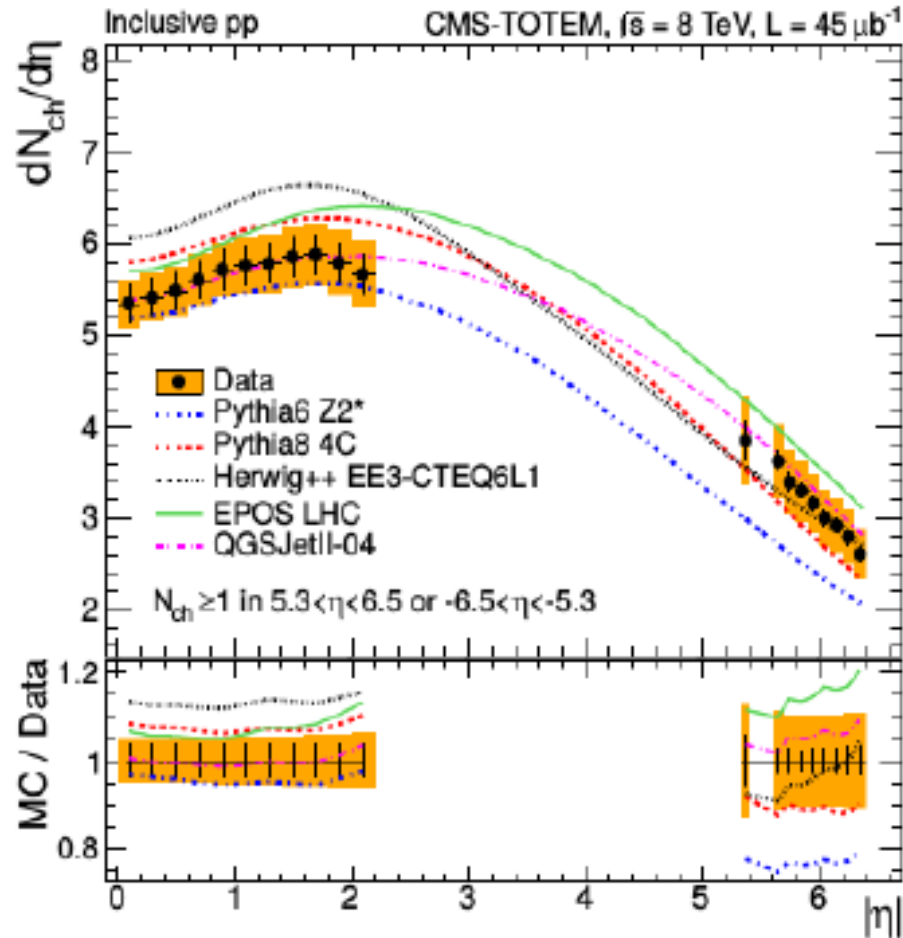


Az első tudományos publikáció a CMS-ből: szögeloszlások



JHEP 1002 (2010) 041

Kombinált adatok a CMS és TOTEM kísérletekből



EPJ C74 (2014) 3053

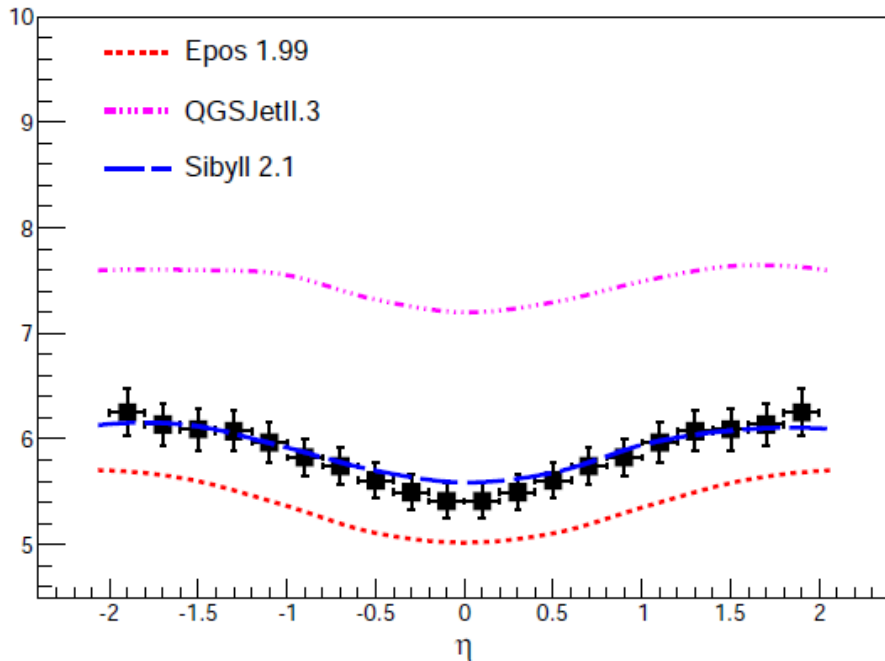
Töltött részecske eloszlások, 13 TeV

A világon elért legnagyobb energiájú laboratóriumi ütközések

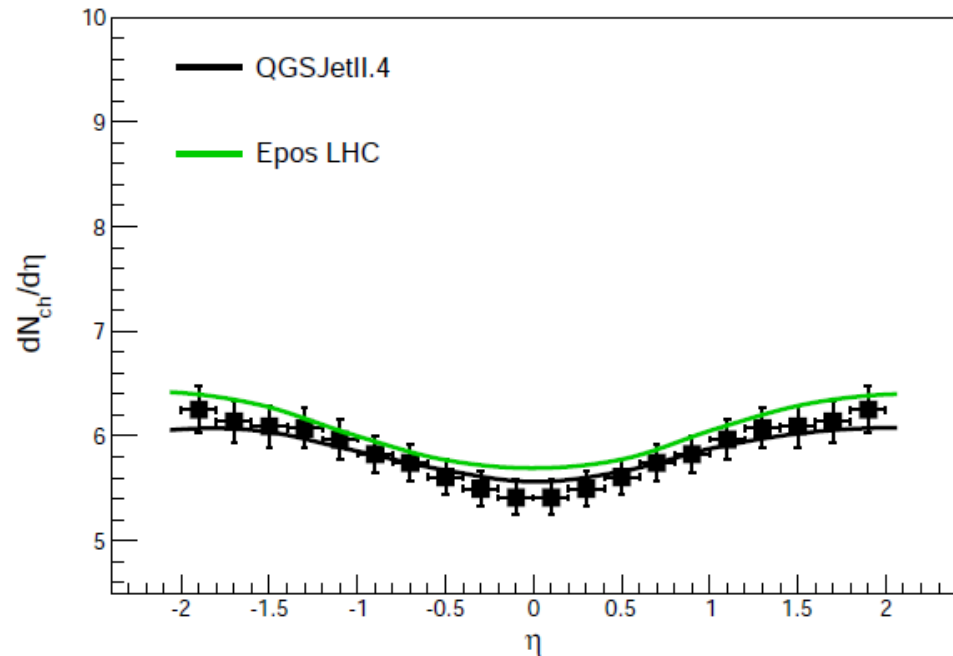
LHC előtti modellek
Adatok: 13 TeV

Modellek a 7 TeV-es LHC adatokhoz
hangolva. Adatok: 13 TeV

CMS 13TeV, Inelastic Events



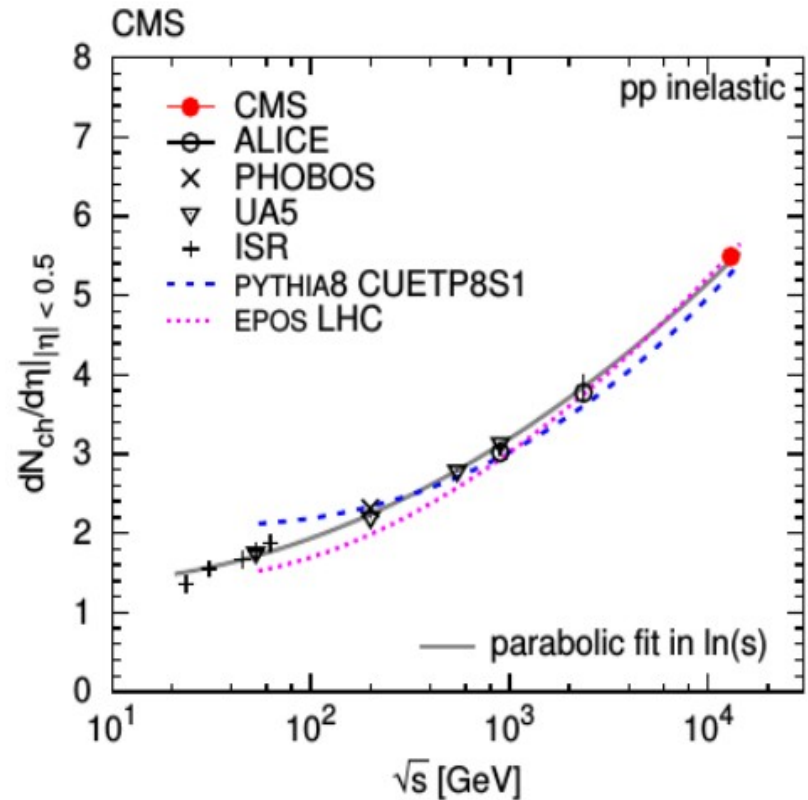
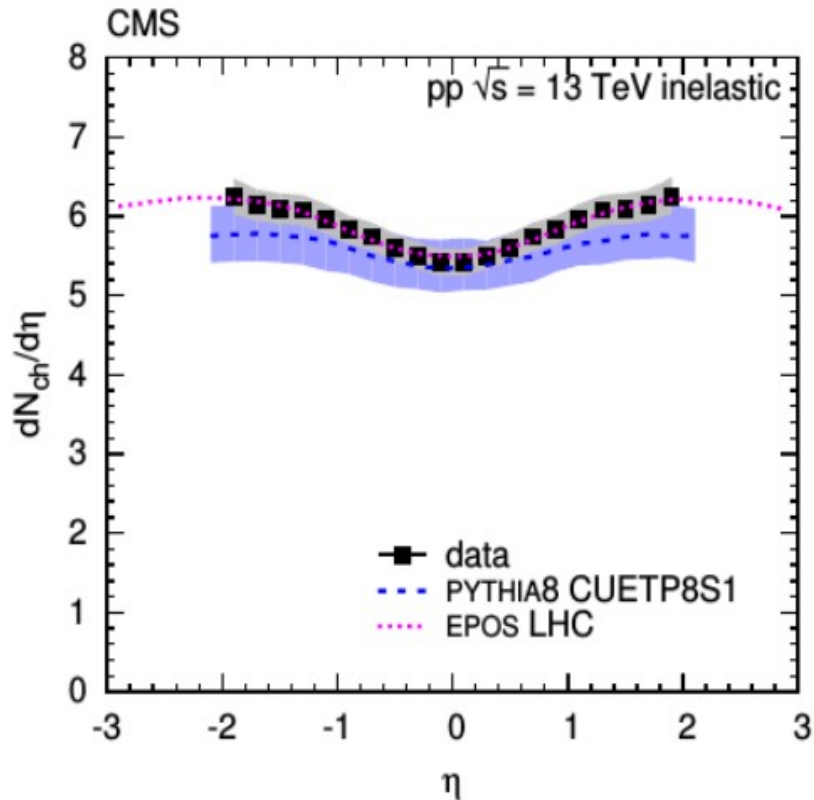
CMS 13TeV, Inelastic Events



adatok: PLB 751 (2015) 143

Nagyon jó extrapoláció egy 2-es faktor erejéig tömegközépponti energiában
NEM JÓ extrapoláció egy 10-es faktor erejéig tömegközépponti energiában

Töltött részecskék száma, 13 TeV

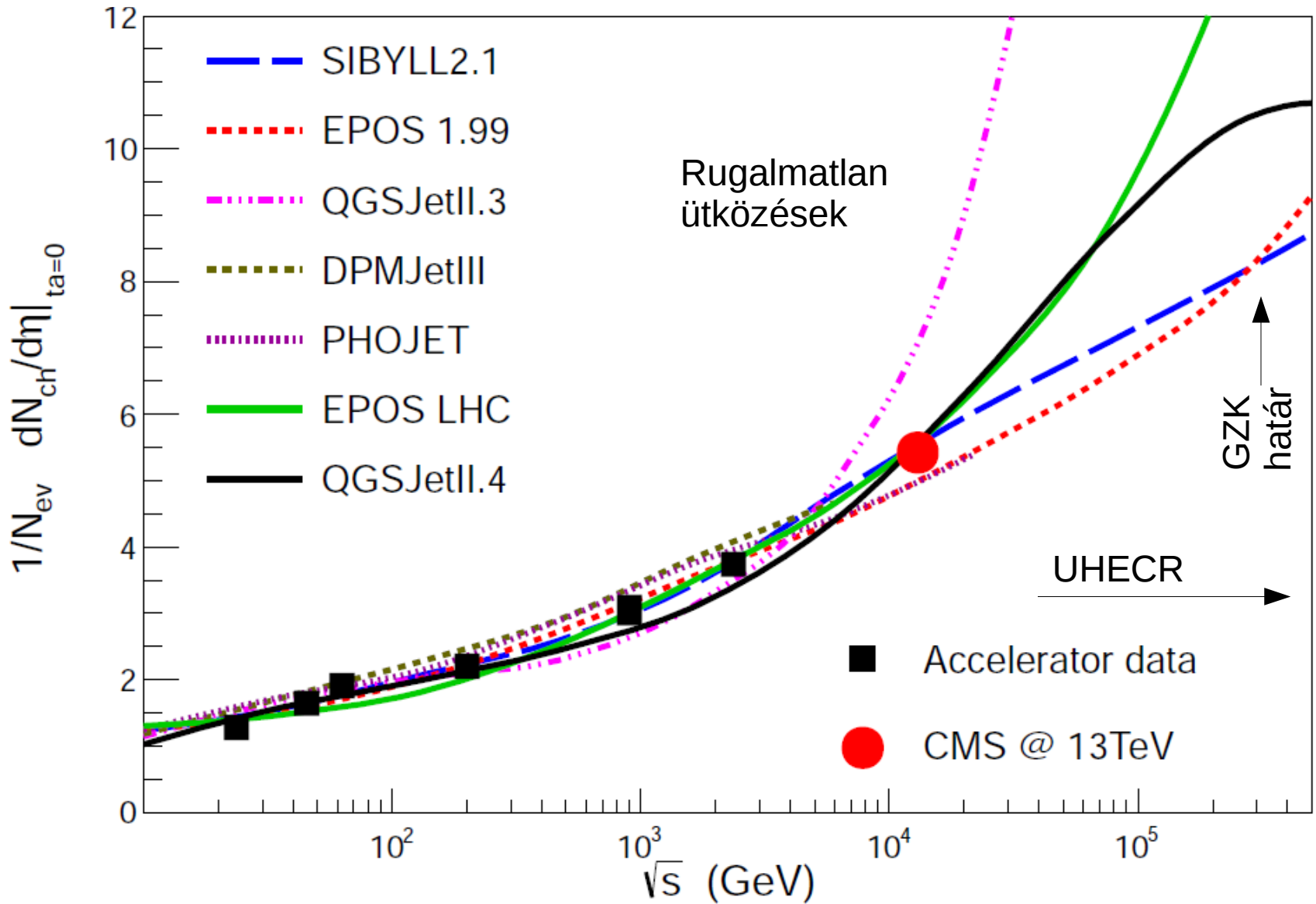


Az első LHC cikk 13 TeV-en, a CMS mágnes KIKAPCSOLVA!

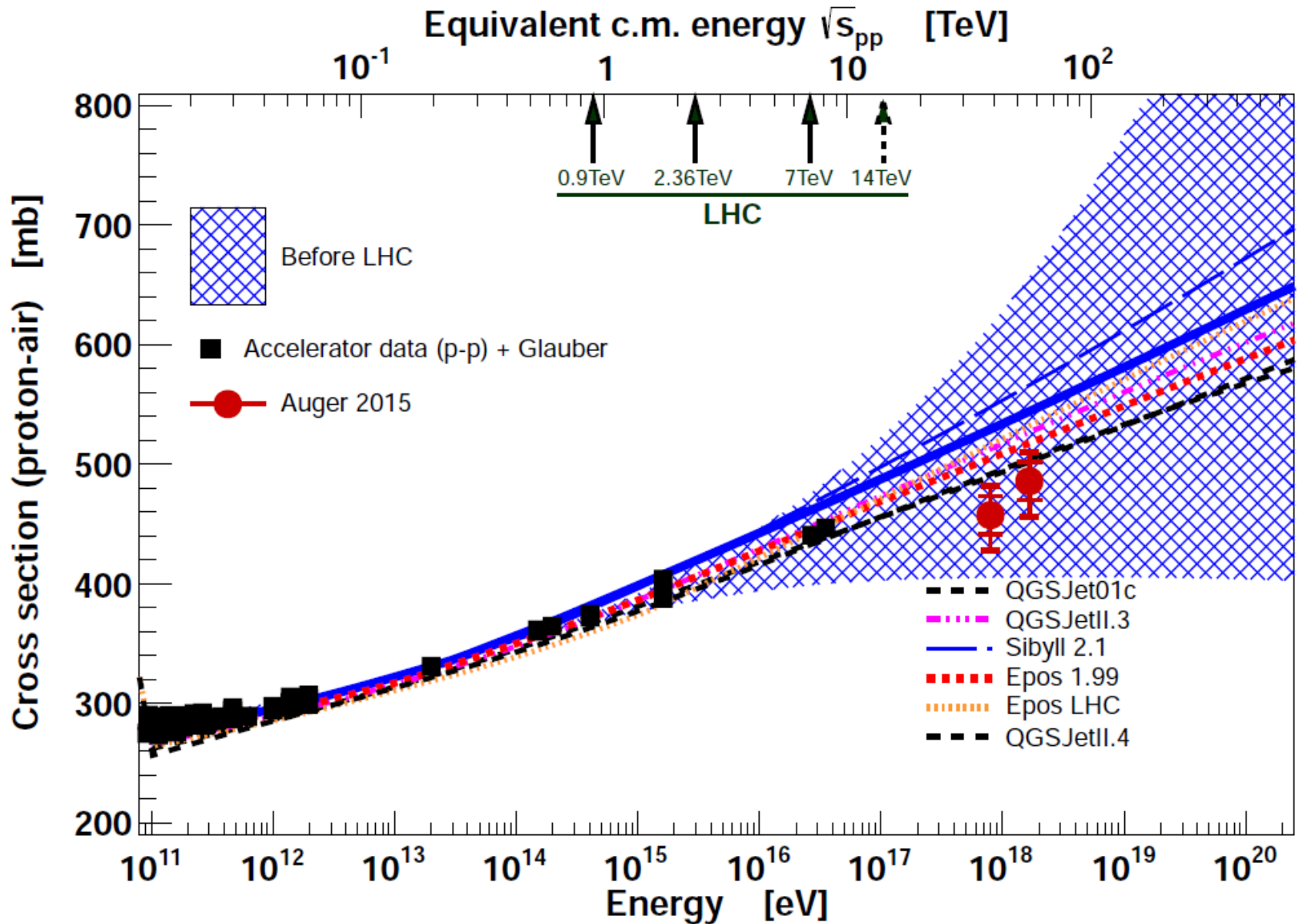
Az EPOS-LHC modell fantasztikusan sikeres

Phys.Lett. B751 (2015) 143

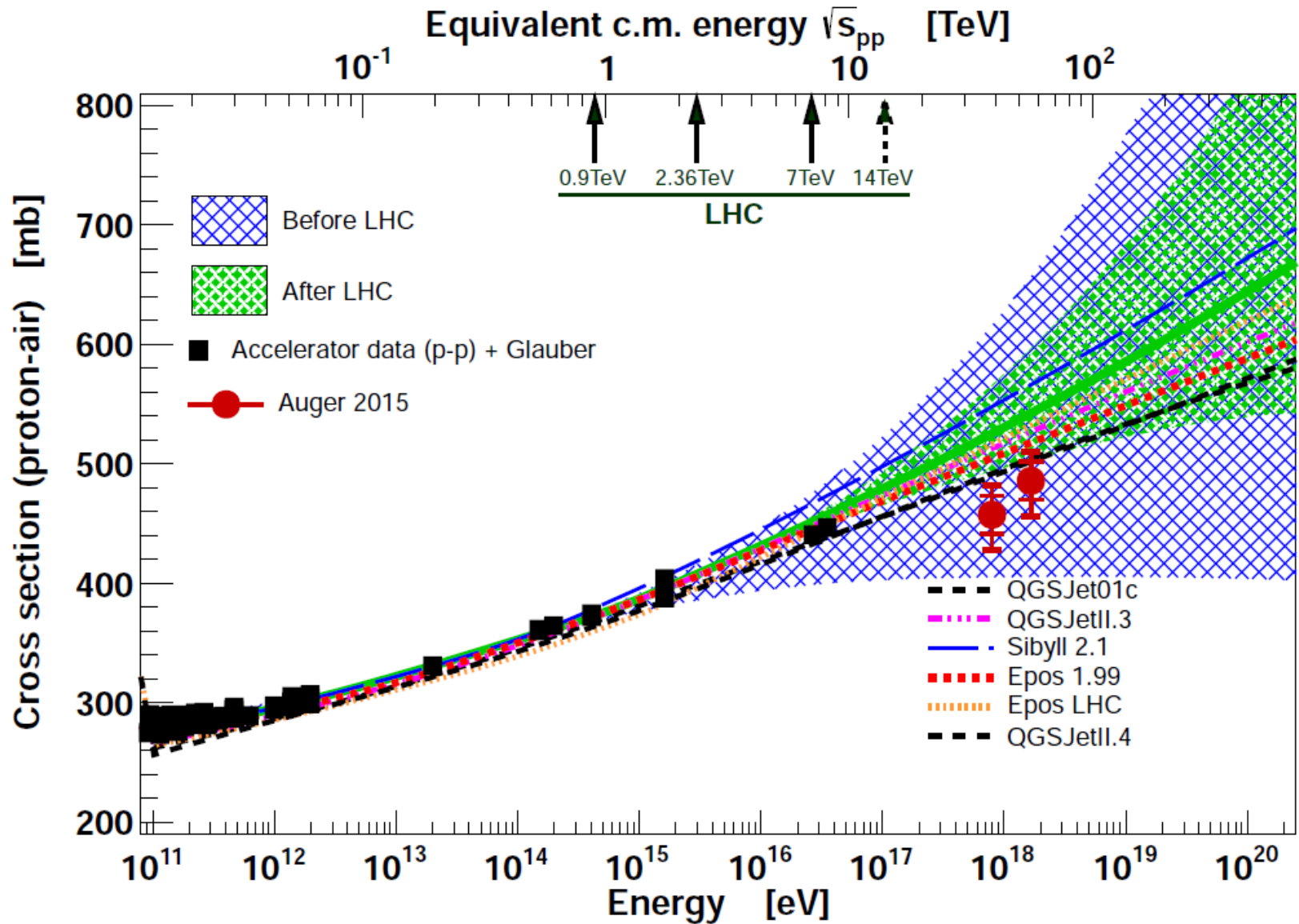
Részecskeszám extrapolálva UHECR tartományba



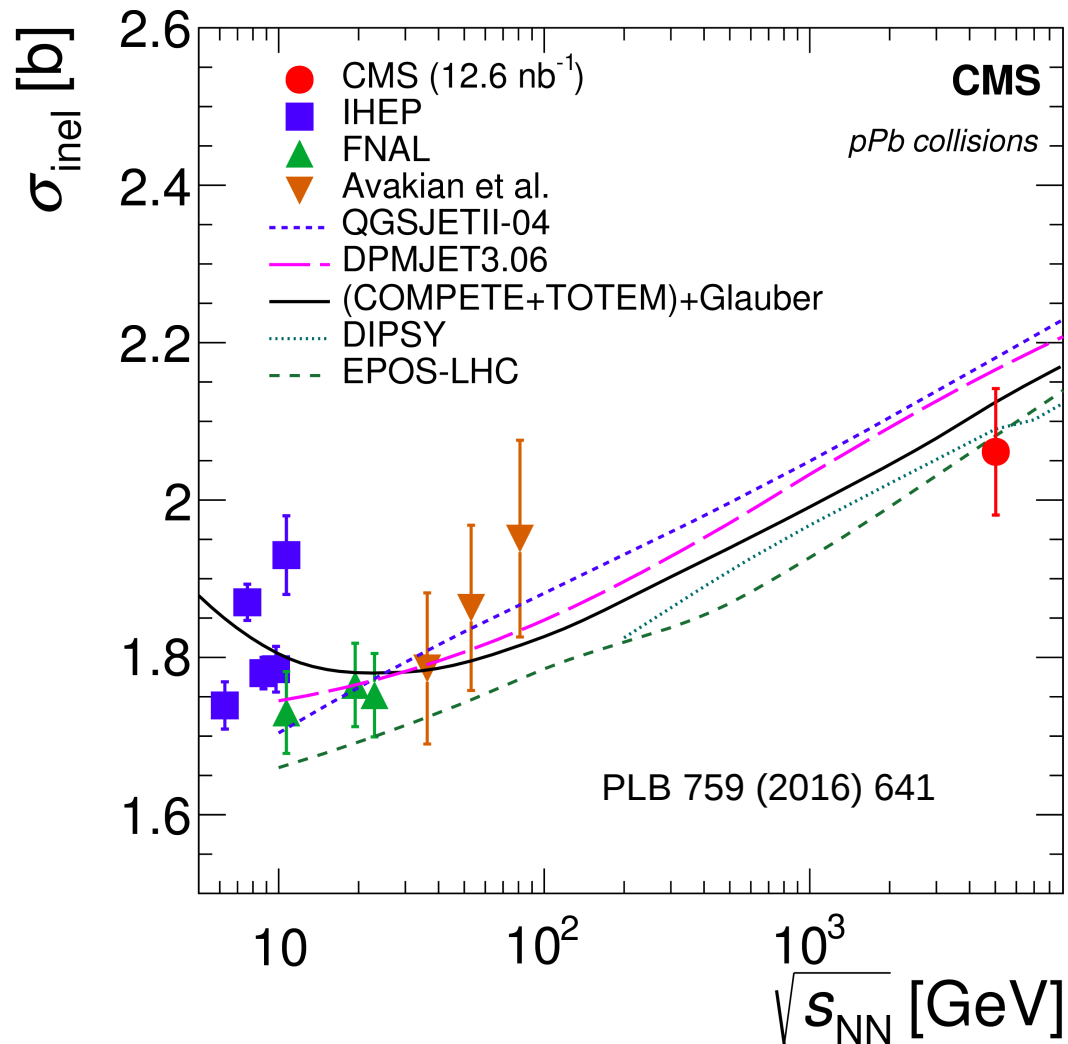
Proton-levegő hatáskeresztmetszet: az LHC előtt



Proton-levegő hatáskeresztmetszet: az LHC után



Rugalmatlan proton-ólom hatáskeresztmetszet, 5.02 TeV



A Glauber-modell közvetlen próbája az LHC-n

Lehetünk jobbak mint egy részecskeütköztető? Használhatunk pion nyalábot?

Ütköztető: nagyon nehéz kis szögben részecskéket mérni
(a részecskék nagy része kimegy a nyalábcsövön)

Álló céltárgyas kísérletek: ideális a teljes térszögű
mérésekhez!

De: kisebb energia

Pion nyaláb: hasznos: a legtöbb kölcsönhatás a kozmikus
sugárzásban pion-atommag ütközés!

LHC: töltéscsere reakció $p+p$ ütközésben

NA49, NA61: pion nyaláb előállítása egy előző céltárgyon

Használhatunk pion nyálábót?

Air Showers

EM Signal

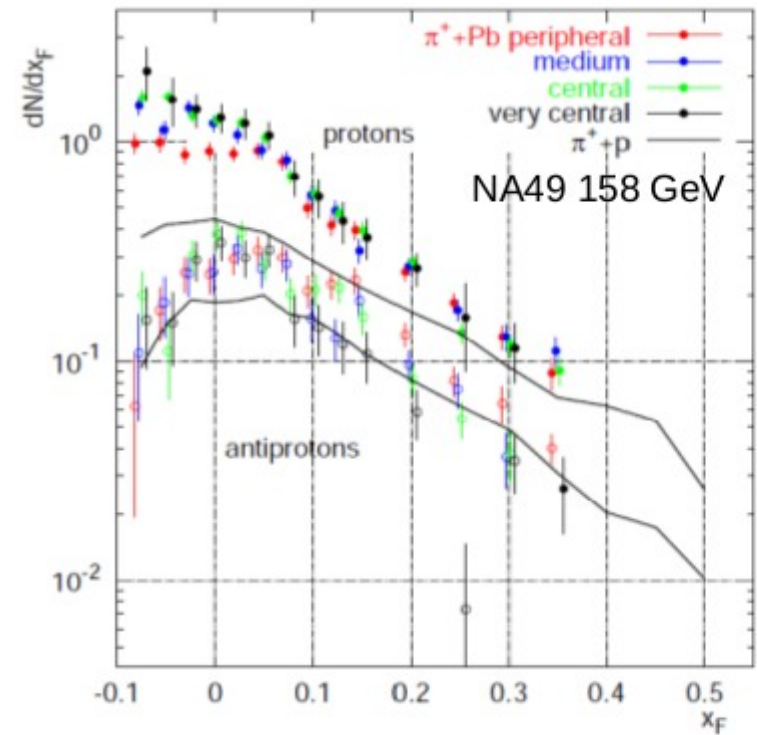
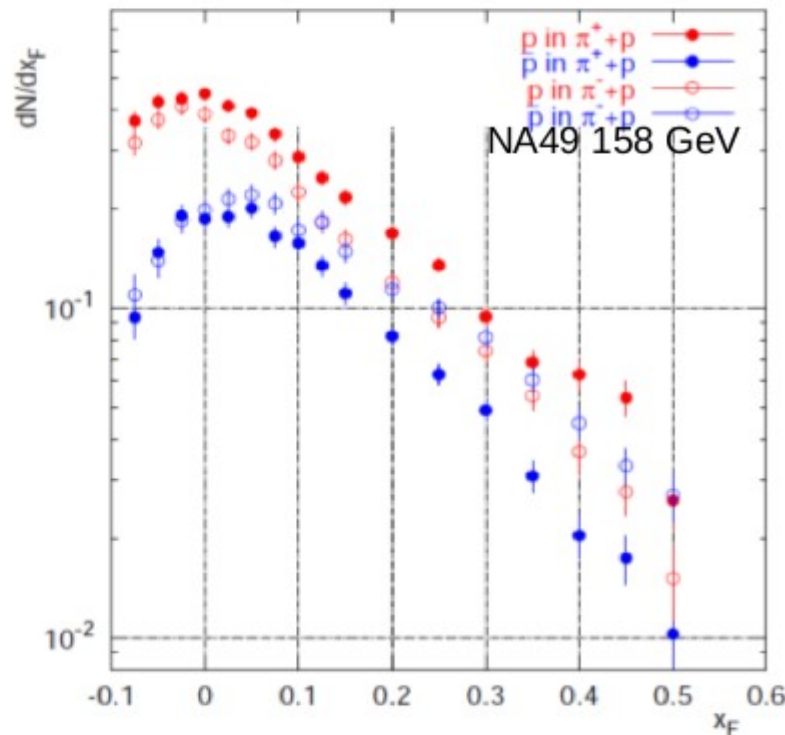
Muon Signal

Nuclear Interactions

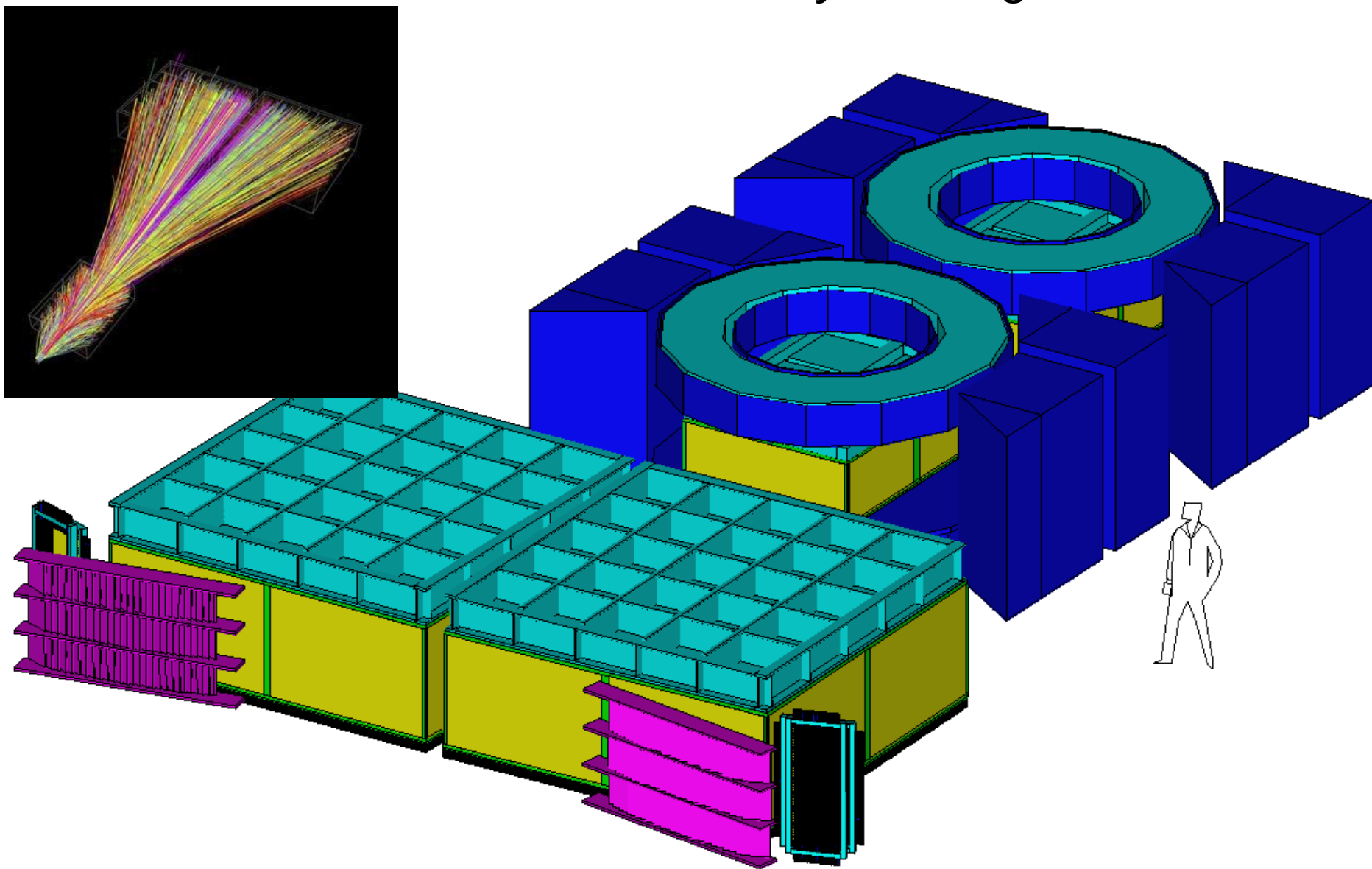
Baryons in Pion Interactions

Data from NA49 (Gabor Veres PhD) : full picture

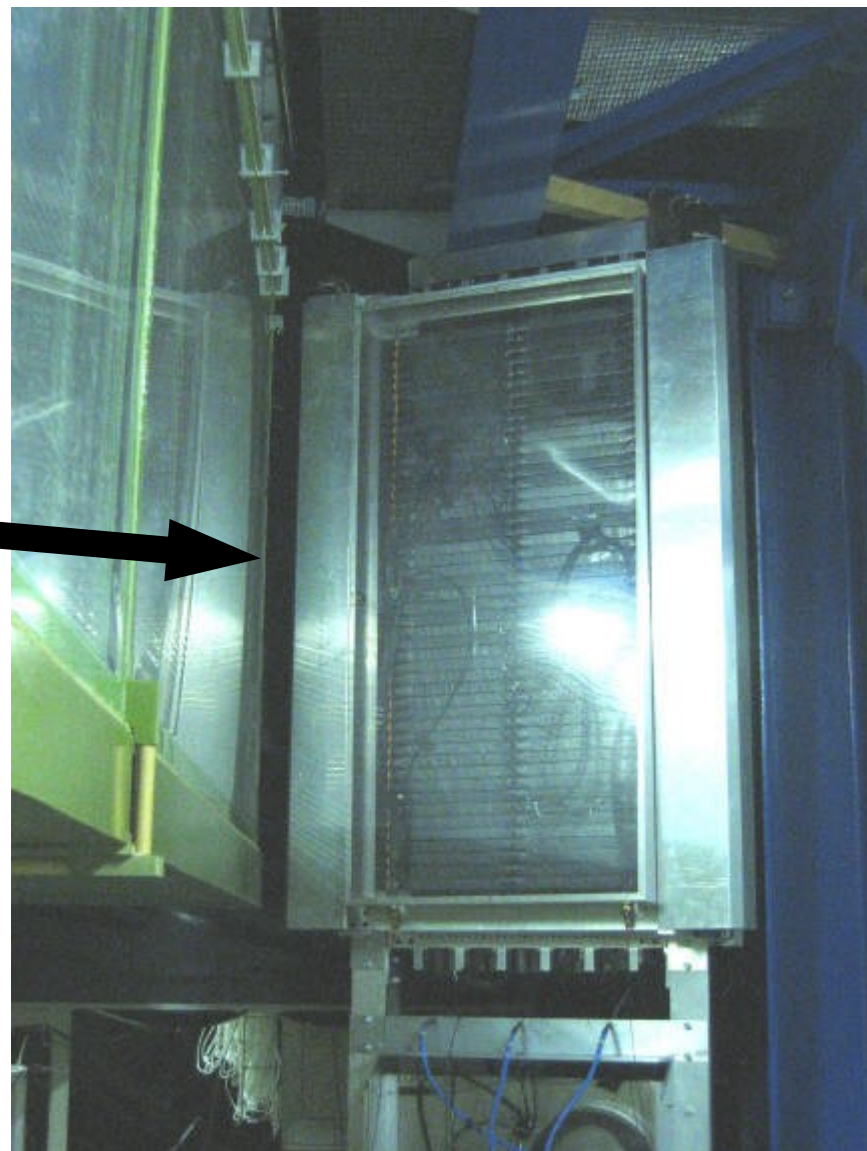
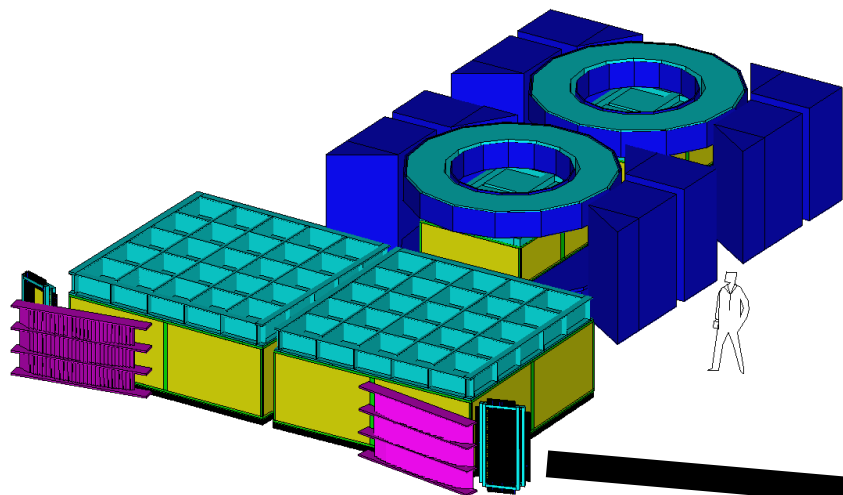
- valence quark effect visible
- large part (half ?) of forward baryon production coming from the target !
- possible new source of low energy muons with small effect on MPD



Itt az ELTÉ-n csinálhatunk ilyen vizsgálatokat?



Itt az ELTÉ-n csinálhatunk ilyen vizsgálatokat?



A magyarok által épített repülési idő fal hamarosan érkezik az ELTÉ-re!

ÖSSZEGZÉS

Az LHC nagyon sok méréssel járul hozzá a kozmikus sugárzás záporainak modellezéséhez:

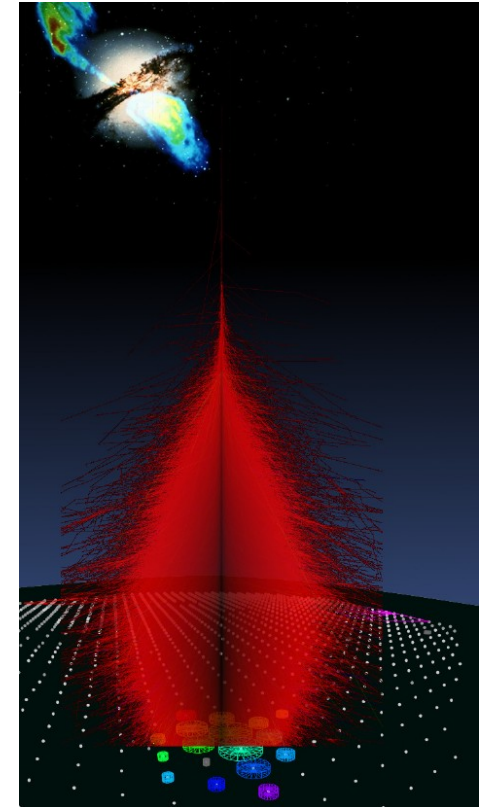
- Töltött részecske eloszlások
- Energiafüggés
- Diffrakció
- Teljes, rugalmas, rugalmatlan hatáskeresztmetszet
- Stb stb stb.

Mit tehetnénk még:

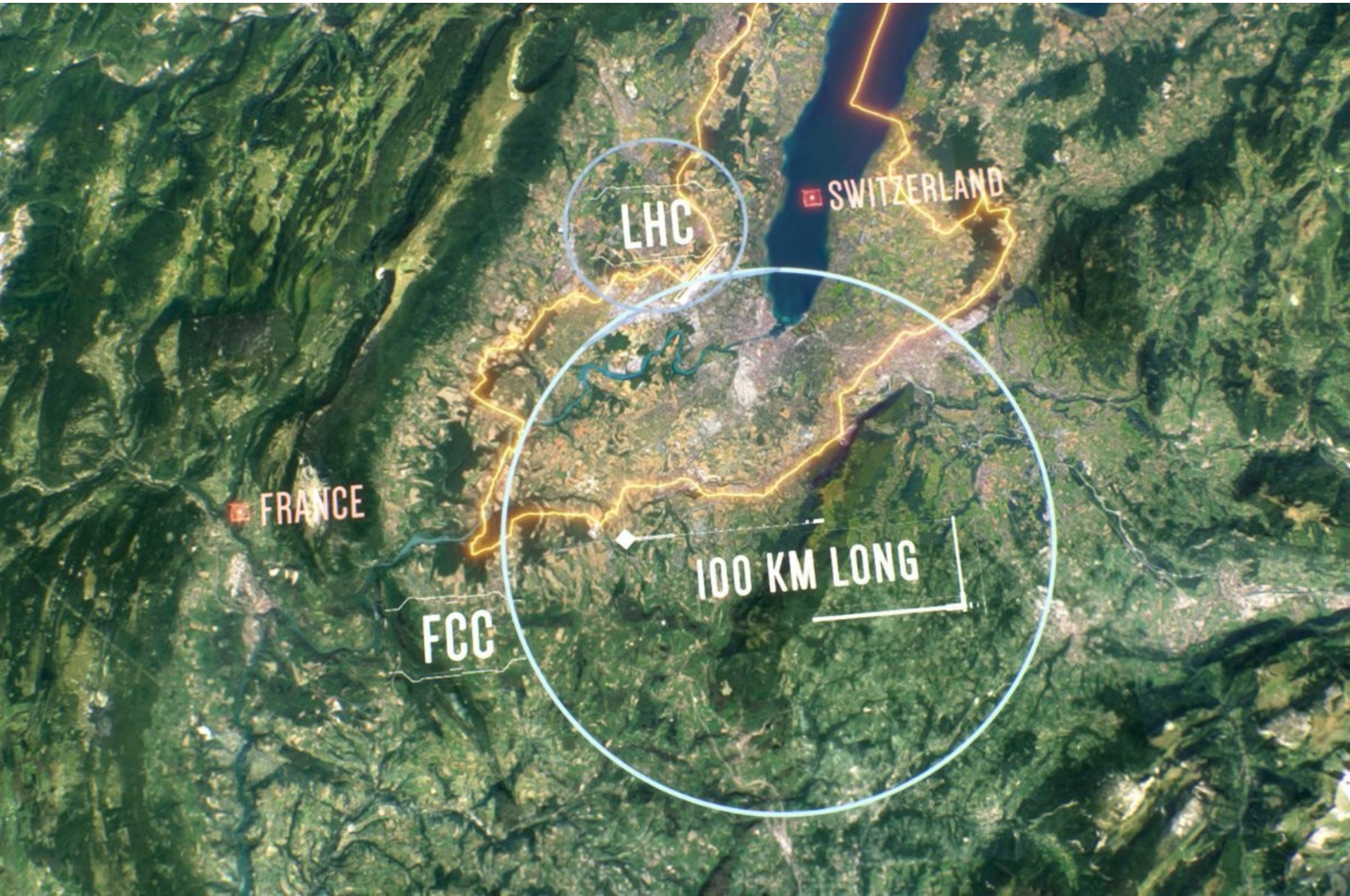
- A fentiek pontosabb mérése
- Energia scan az LHC-nál, 0.9 TeV-től (nagy x_F tartomány)
- ion tömeg scan: proton-ólom, proton-oxigén,...
- speciális mérések kis szögű detektorokkal
- Mérések “pion nyalábbal”

Modellek (az LHC után) még mindig nem egyeznek jól a kozmikus zápor adatokkal:

- Modell limitációk
- Nincs könnyű céltárgy az LHC-nél



A Future Circular Collider (FCC) terve



Köszönetnyilvánítás

NKFIH OTKA pályázatok No. 123842, 124845, 128713
MTA-ELTE Lendület CMS Részecske és Magfizikai Csoport
Mindenféle előadás Ralf Ulrichtól és Sergei Ostapchenko-tól
A CMS, és TOTEM kísérletek publikációi



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

