

Magyar Fizikus Vándorgyűlés 2016 Szeged

# Képalkotás kozmikus részecskék nyomkövetésével

Oláh László<sup>1</sup>

MTA Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoport és a REGARD csoport nevében

<sup>1</sup> MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

2016. augusztus 26.

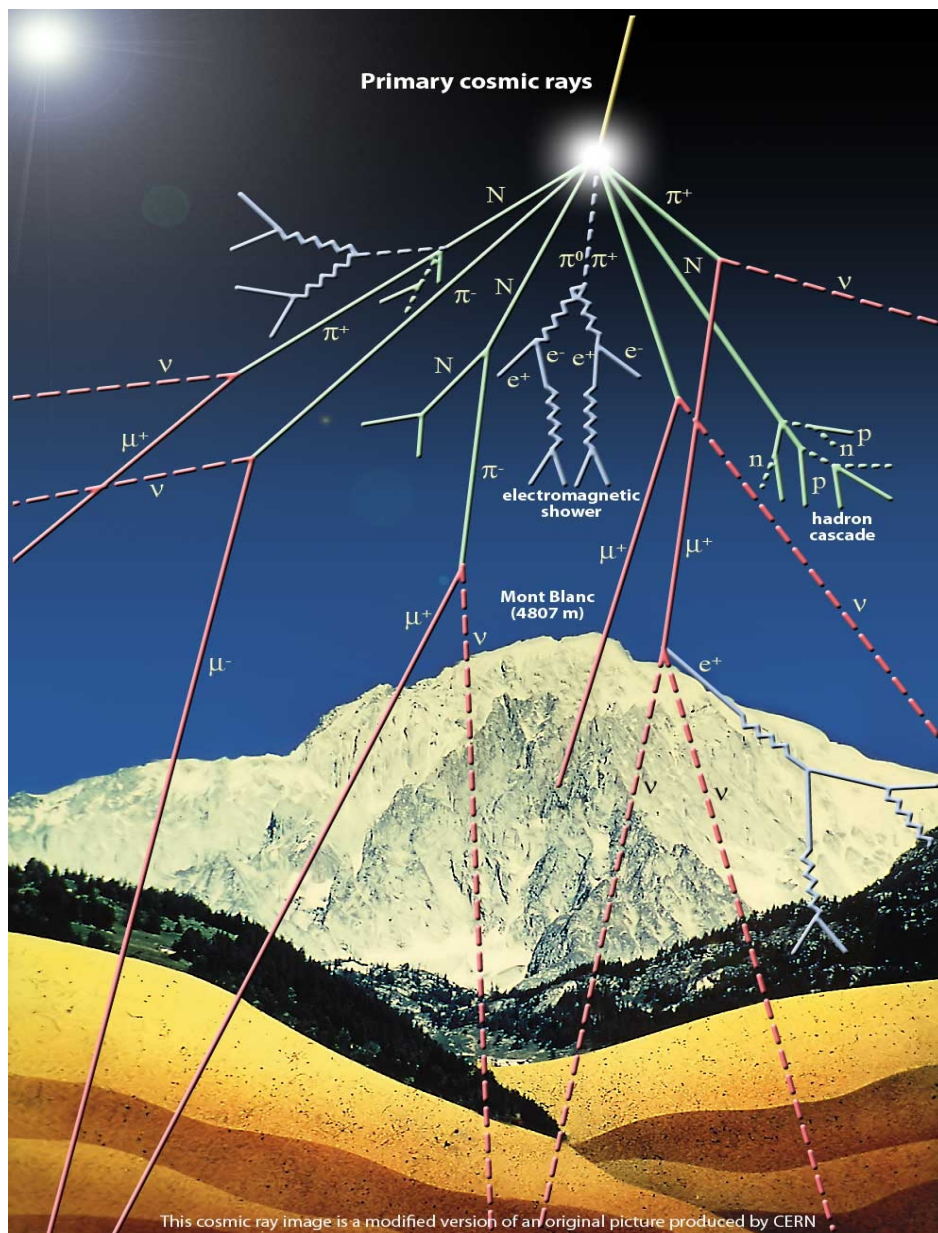
Lendület program



# Tartalom

- I. Motiváció**
- II. Föld alatti üregek kutatása gáztöltésű detektorokkal**
- III. Vulkánok átvilágítása gáztöltésű detektorokkal**
- IV. Kis sűrűségű anyagok képalkotása**

# I. Motiváció: kozmikus sugárzás, müon radiográfia

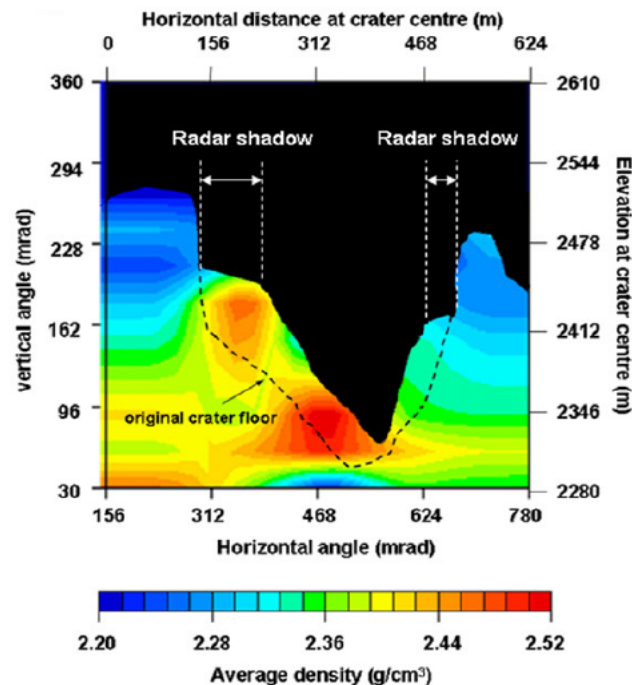


- Izotróp elsődleges kozmikus sugárzás :  
(p, He, ..., Fe)
- Erős kölcsönhatás a légkör O, N atomjaival  
→ rövid élettartamú másodlagos részecskezápörök (főleg pionok, kaonok)
- Másodlagos részecskék bomlása és EM zápor a légkörben: müonok, elektronok, gammák, stb.
- **Müonok:**
- Relatív nagy energiatartomány (MeV - TeV), nagy áthatolóképesség ( $-dE/dX \sim 2 \text{ MeV cm}^2 \text{g}^{-1}$ )
- Müonok fluxusa csökken anyagon történő áthaladásuk során:
  - az anyag sűrűsége (vastagsága) meghatározható a müonok fluxusának mérésével a vastagság (sűrűség ismeretében)
  - **radiografikus képalkotás kozmikus müonokkal (müon radiográfia)**

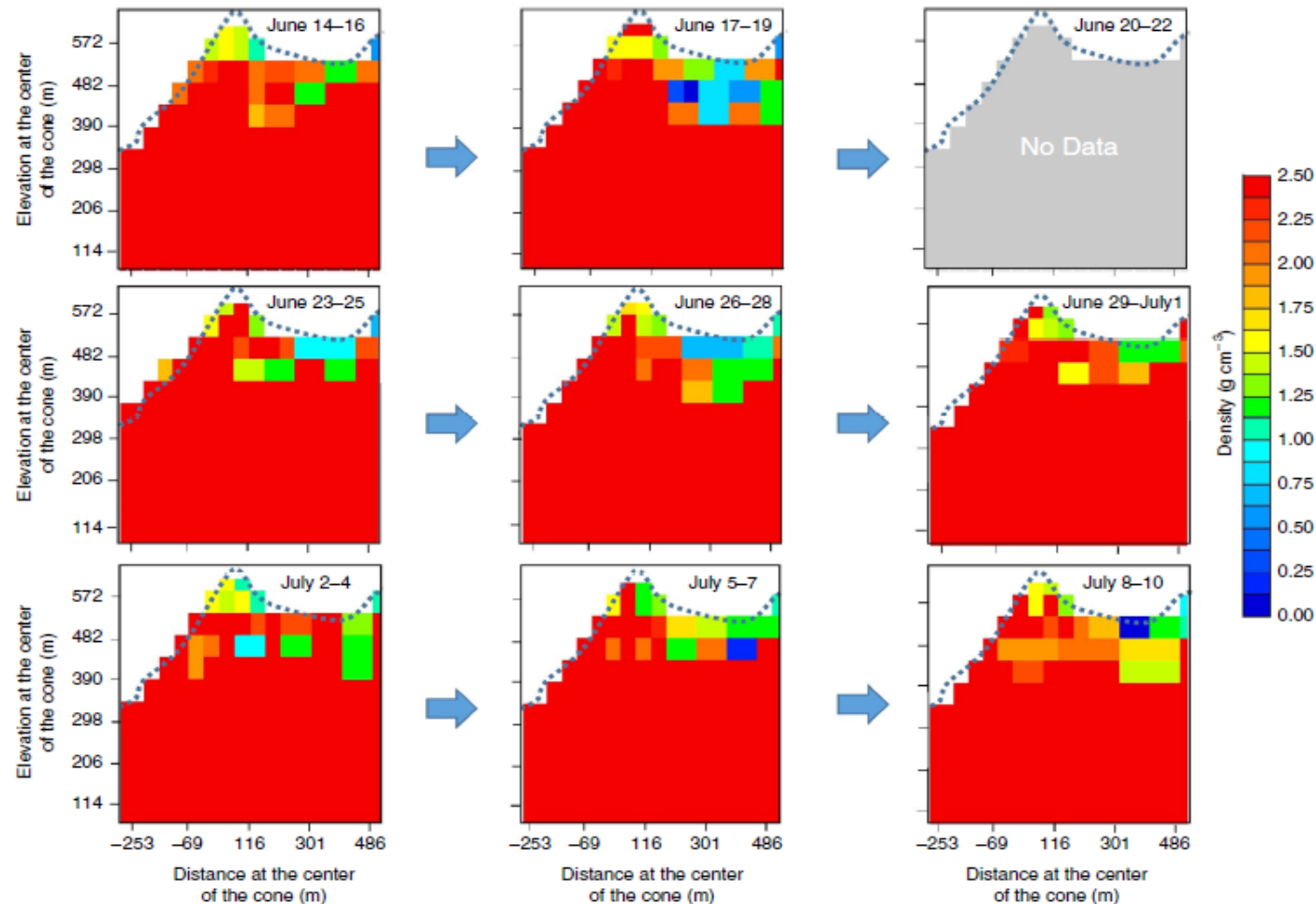
# I. Motiváció: alkalmazás földtudományokban, régészetben

- Bányászat: nagy sűrűségű kőzetek, ércek lokalizálása
- Barlangkutató, régészet: rejtett üregek, kamrák felfedezése
- Vulkanológia: vulkánkitörés előrejelzése a sűrűségeloszlás online monitorozásával

H. Tanaka et al.:  
Earth Pl. Sci. Let. 263 (2007) 104  
**Első „műográf” egy aktív  
vulkánról (Mt. Asama)**



H. Tanaka et al.: Nature Communications 5, Article no.: 3381 (2014)  
**A kitörő Satsuma-Iwojima vulkán monitorozása műonokkal**

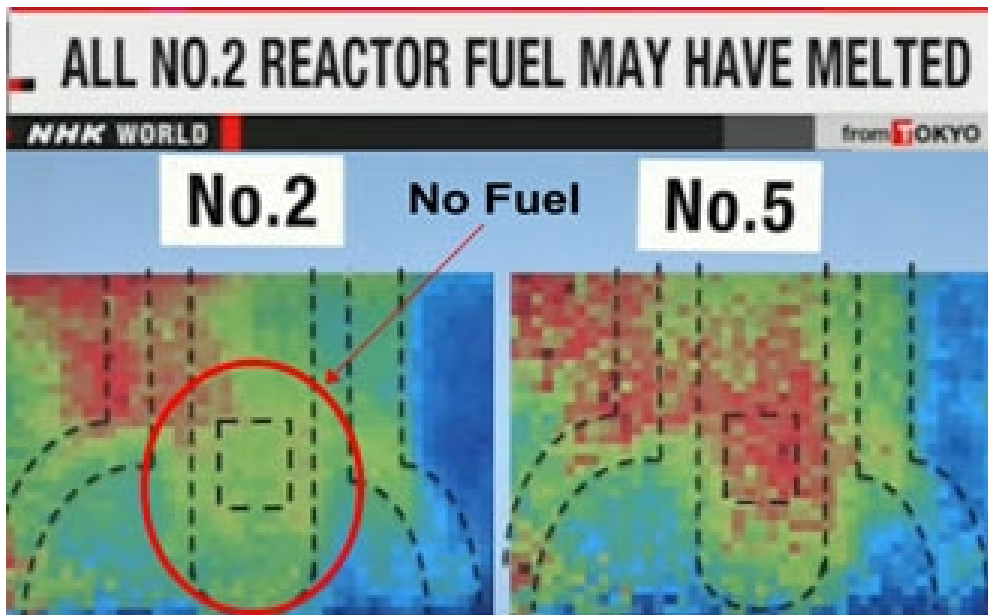


# I.Motiváció: anyag- és szerkezetvizsgálat

- Atomreaktorok szerkezetének vizsgálata müon radiográfiával
- Nukleáris csempészaruk detektálása müonok többszörös szórásának mérésével

Müon radiográfiával megvizsgálták a fukushimai atomerőmű reaktorait: leolvadt a fűtőanyag a 2-es számú reaktorban!!!

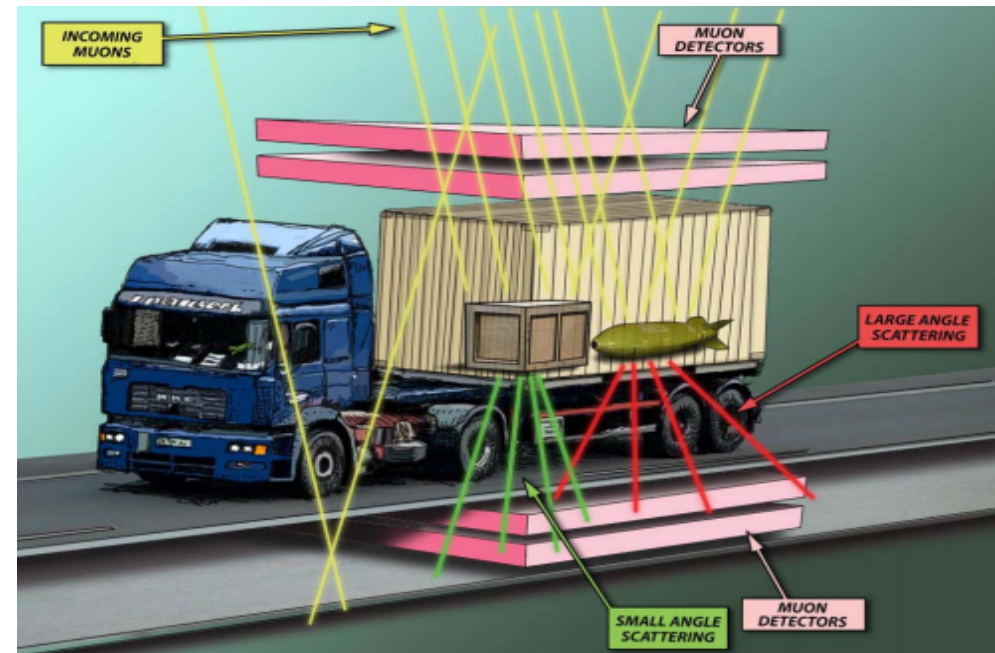
Physical Society of Japan meeting, Kunihiro Morishima és munkatársai ( 2015):



**Tomográfia müonok többszörös szóródásának mérésével:**

K. Borozdin et al.: Nature 422, 277 (2003)

L. Morris et al.: AIP Advances 2, 042128 (2012)



# I. Motiváció: Detektorok és korlátozó tényezők

- Optimális detektor müon radiográfiára:

- Stabil működés „kint”, változékonny környezetben is
- Alacsony fogyasztás ( $< 50$  Watt)
- Megbízható információ a részecskepályákról:
  - Ésszerű szög- ( $< 2$  fok) és helyfelbontás ( $< 1$  cm)
  - Kiváló trigger és nyomkövetési hatásfok ( $> 95$  %)
- Folyamatos hozzáférés és online monitorozás
- Hordozhatóság



- Müon radiográfia korlátozó tényezői, nehézségei:

- Limitált fluxus: nagy detektor felület, mérési idő
- Föld alatt a detektort a vizsgált terület alá kell helyezni
- Szabad ég alatt az elektronok és kis energiás ( $< 1$  GeV) müonok háttérrel alkotnak:  
Háttér vizsgálata és jel/zaj viszony maximalizálása
- Kis rendszámú anyagokat meg lehet-e különböztetni ???



## **II. Föld alatti üregek kutatása gáztöltésű detektorokkal**

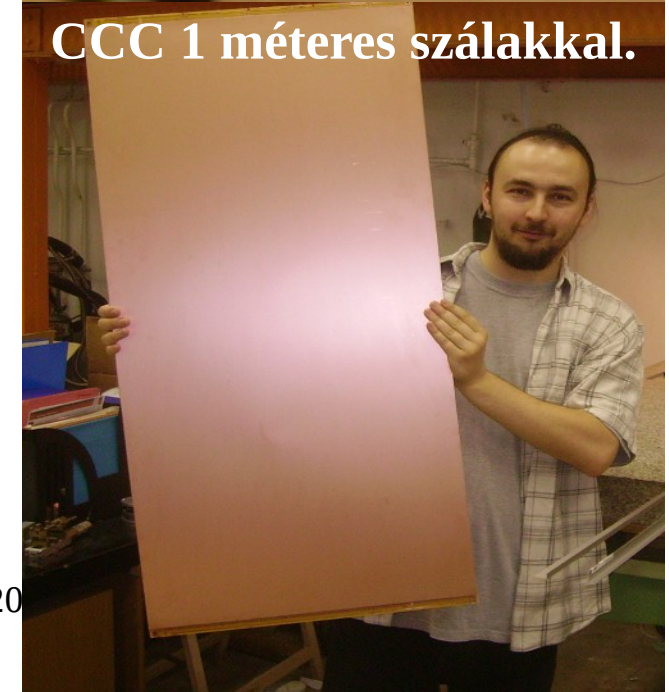
# Közele katódos kamrák (Close Cathode Chamber, CCC)

- **Gáztöltésű detektor:** töltött részecskék ionizációjának helyét határozza meg töltéssokszorozás után
- **CCC: aszimmetrikus sokszálas proporcionális kamra** (lásd Varga D. előadásában)
- **Folyamatos gázáramlás (0.5-1 L/h):** nem gyúlékony, környezetbarát Ar – CO<sub>2</sub> (82% - 18%)
- **Nagyfeszültség:** +1000 V az anódszálaikon, -500 V a térformáló szálaikon és katódon
- **2D helymeghatározás** (szálak és parketták)
- **Öntriggerelés** az anódszálaik együttes jelére
- Kis anyagköltség (kb. 4 kg / m<sup>2</sup>, ~ 1.5 % sugárzási hossz vastagság)
- Csökkentett (~ 100-200 μm) mechanikai tolerancia

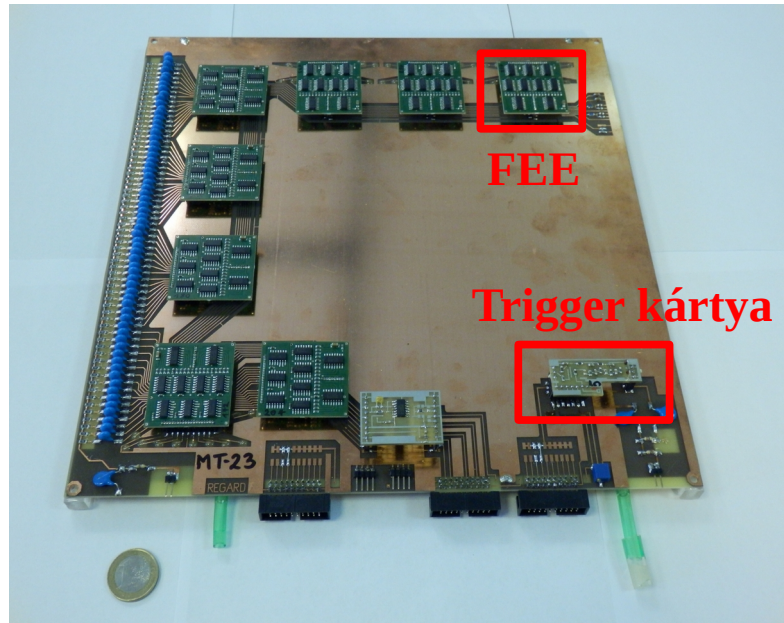
Varga D. és munkatársai:  
NIM A 648 (2011) 163  
NIM A 698 (2013) 11



CCC 1 méteres szálaikkal.



# Integrált adatgyűjtő rendszer (DAQ)

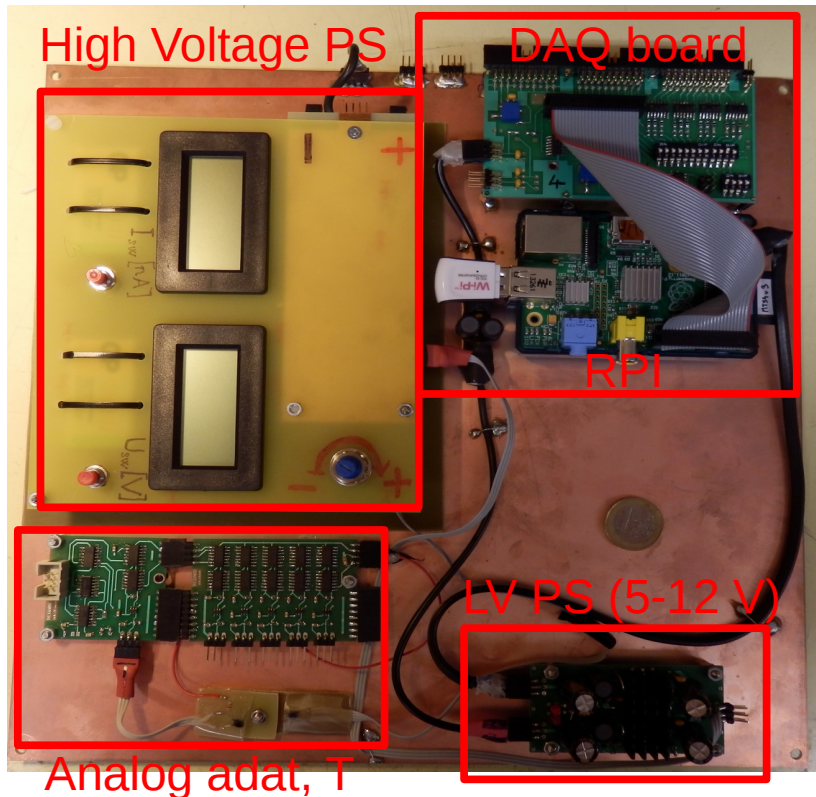


## Adatkiolvasás Front-End Elektronikákkal (FEE):

- Soros kiolvasás: FEE (16 csatorna per FEE) egy láncra fűzve
- Analóg jelek erősítése és diszkriminálása (digitalizálása) logikai integrált áramkörökkel (IC)
- Trigger jel: az anódszálak közös jelének kivezetése

## Raspberry Pi (RPI) számítógép alapú DAQ:

- Adattárolás és management (16 GB SD)
- Távoli hozzáférés & kontrol Wifin keresztül
- Online analízis beépíthető a DAQ-ba
- **DAQ kártya:**
  - 10 bementi vonal a digitális adatoknak és külső vonal analóg adatoknak vagy környezeti változókat mérő (T,H,p) szenzoroknak
  - Triggerelés: holt idő mérése, változtatható koincidencia és zajszint, stb.



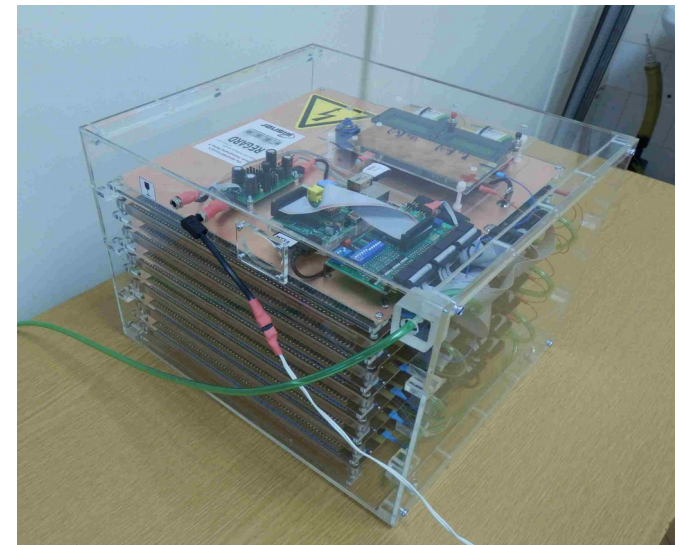
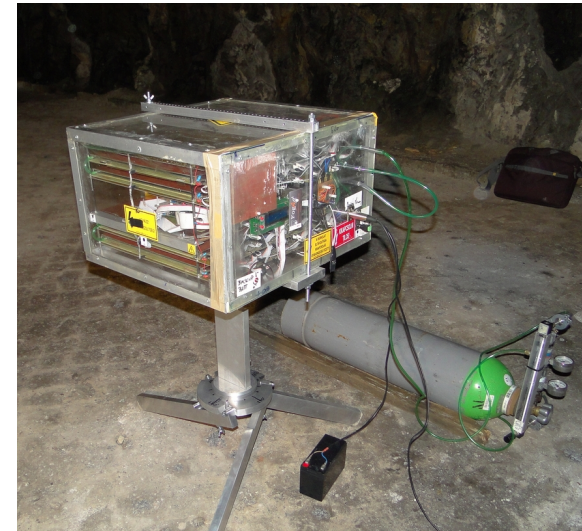
# Hordozható detektorok föld alatti müon radiográfiára

- **5 -6 CCC detektor párhuzamosan egymás alatt elhelyezve:**
  - Érzékeny felület per réteg:  **$0.1 \text{ m}^2$**
  - Szögfelbontás: **15 mrad**
  - Helyfelbontás: **1.5 mm**
  - Kis energia levágás:  **$< 10 \text{ MeV}$**
- Plexidoboz védi a környezettől
- Kézben hordozható:
  - **térfogat  $< 0.5 \times 0.5 \times 0.25 \text{ m}^3$**
  - **Teljes súly  $< 20 \text{ kg}$**
- **Integrált adatgyűjtő rendszer**
- Környezeti paraméterek (T,H,p) monitorozhatók
- Felhasználóbarát:
  - LCD kijelző, SD kártya
  - Wifi-n keresztül elérhető akár mobiltelefonnal is
- **Teljes fogyasztás:  $< 6 \text{ W}$**

Nucl. Instrum. Meth. A 689 (2012) 60

Geosci. Instrum. Method., 1, (2012) 229

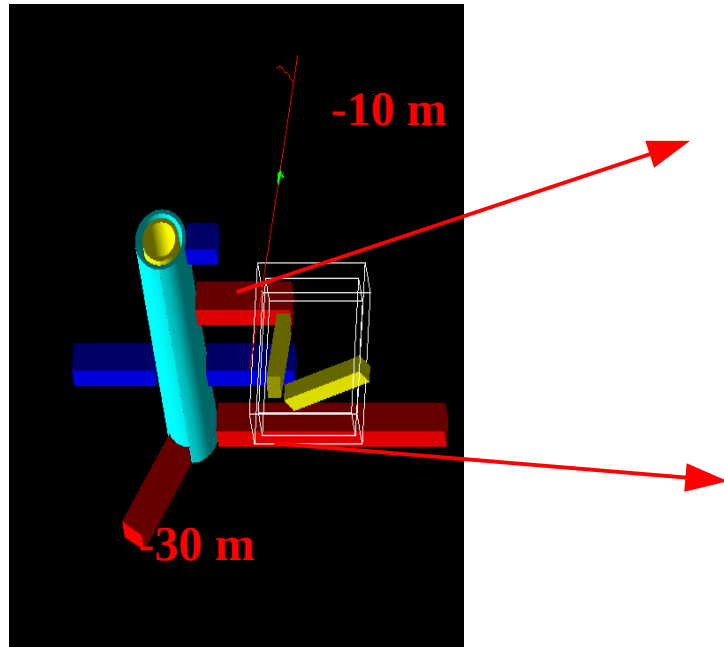
Advances in High Energy Physics, 560192 (2013) 1



# Mérések föld alatti alagutakban

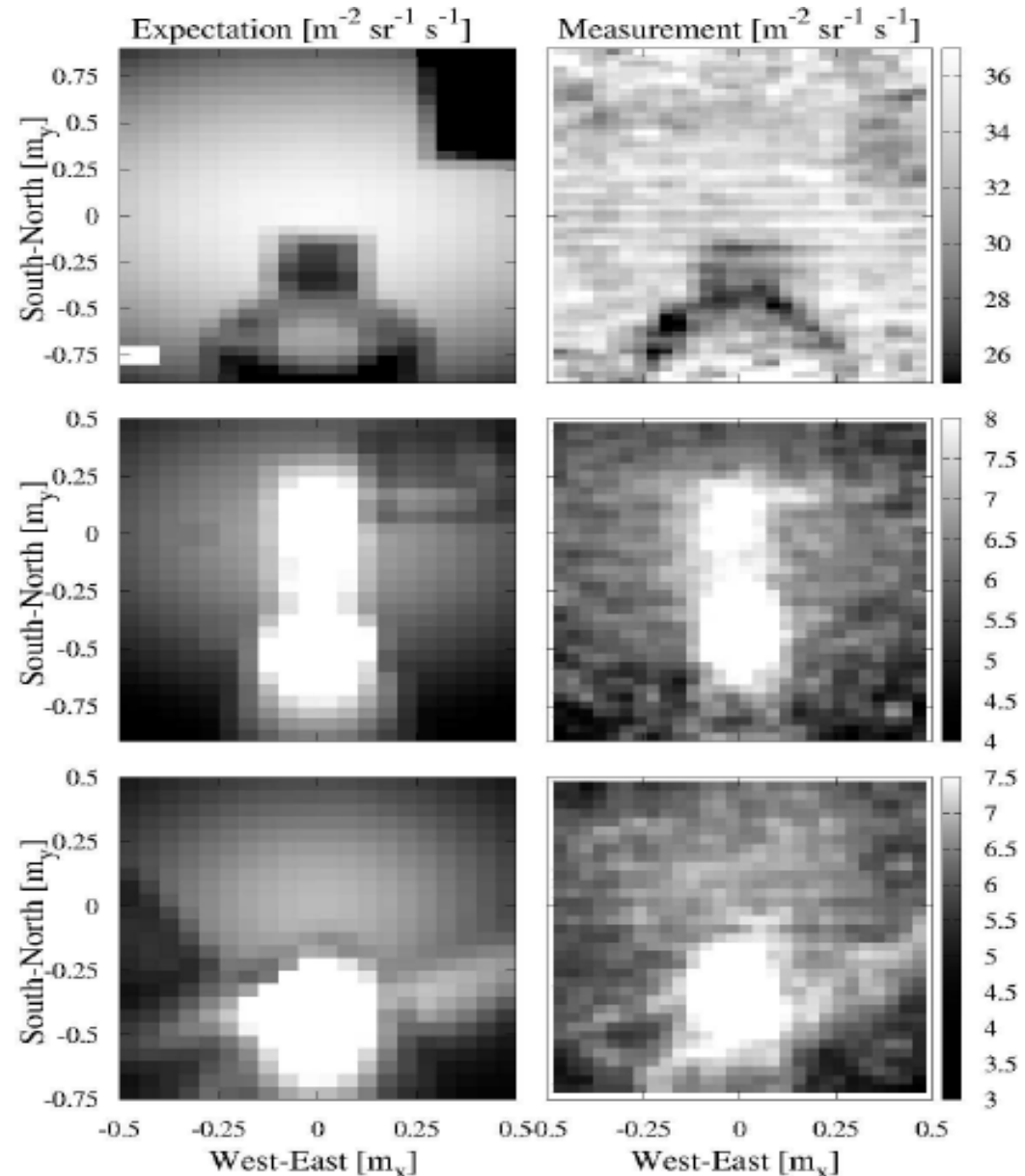
Épület- és alagútszerkezetek láthatók a mérésekben!

Journ. Phys. Conf. Ser. 632 (2015) 012020

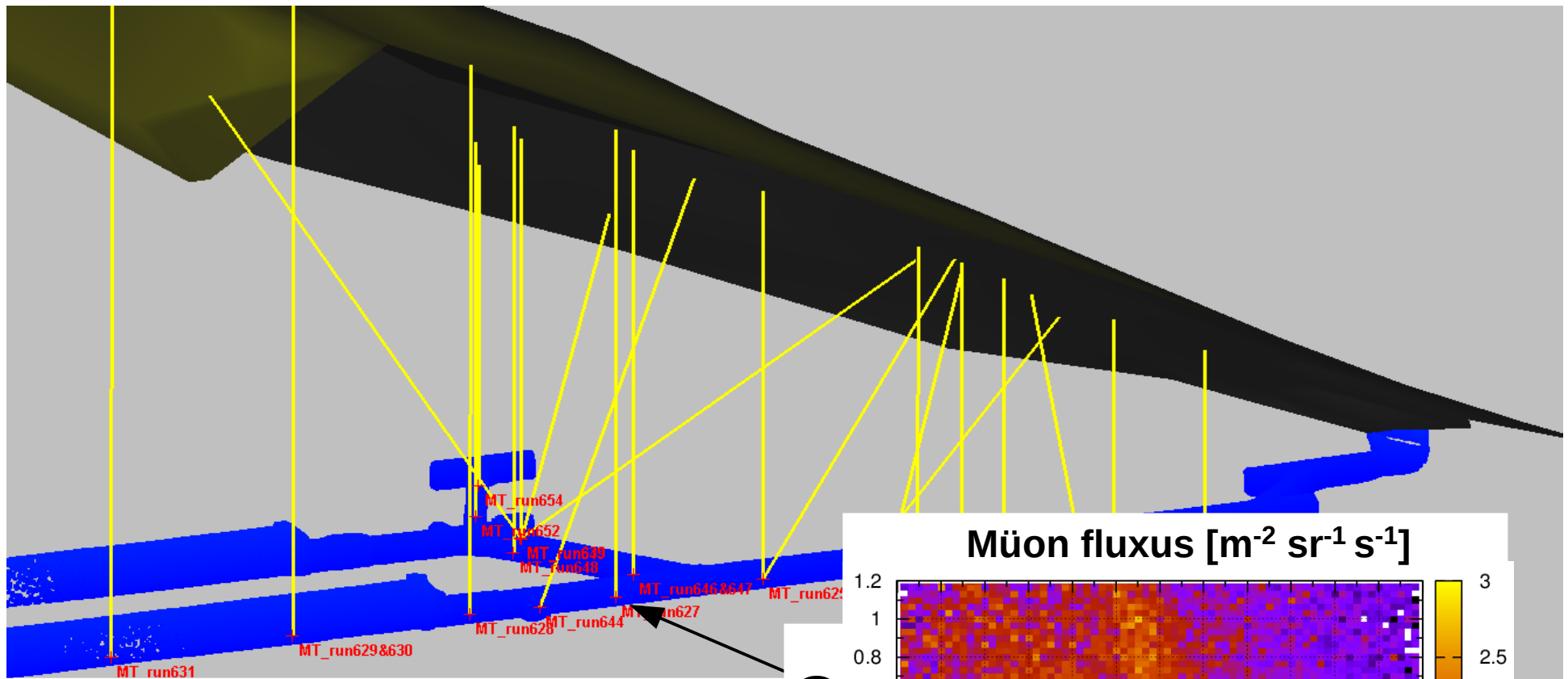


Jánosy akna @ MTA WIGNER FK

1. Geometria felépítve GEANT4-ben
2. Energia vesztesége a müonoknak  
→ talaj vastagság
3. Talaj vastagság →  
Müon fluxus empirikus formulával  
J. Phys. G: Nucl. Phys. 9 (1983) 1577



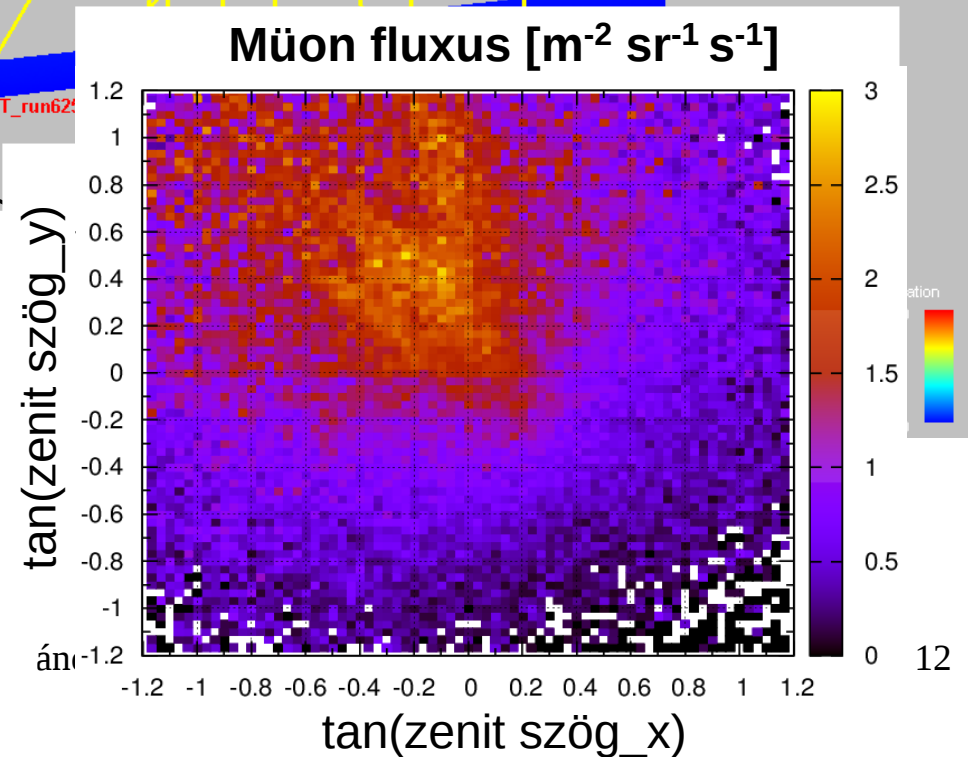
# Rejtett üregek keresése a Királylaki táró felett



Mért müonfluxus a detektor rendszerében:  
Detektor rendszerben:

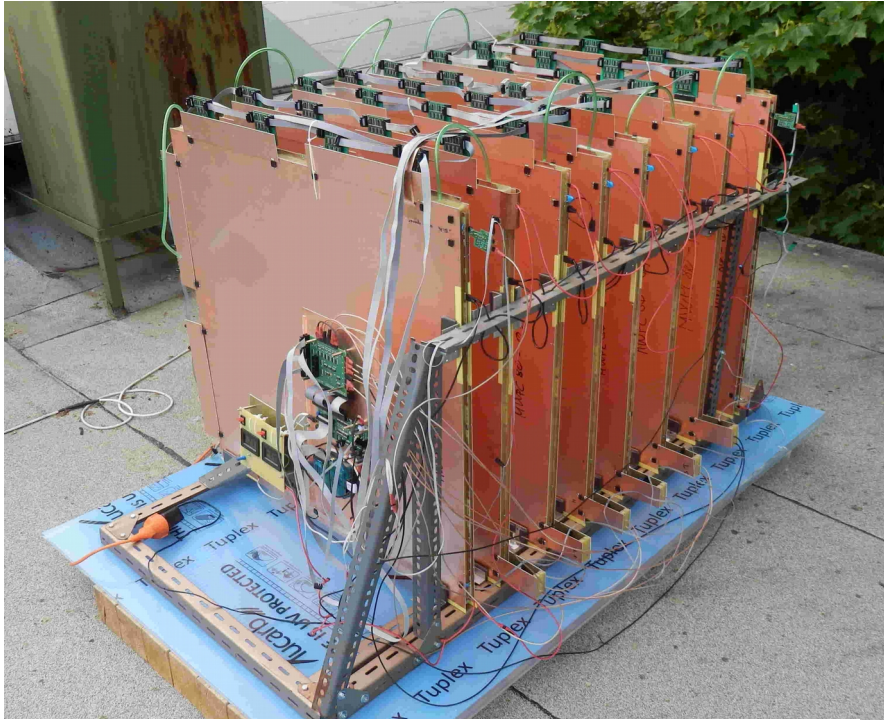
- Mérések a táró belsejében (Surányi Gergely):  
Megnövekedett fluxus közet-inhomogenitás  
(üreg???) jelenlétére utal

Több irányból elvégzett mérések adatainak  
inverziójával a sűrűség-hosszak számolása  
(Molnár Gábor, ELTE)

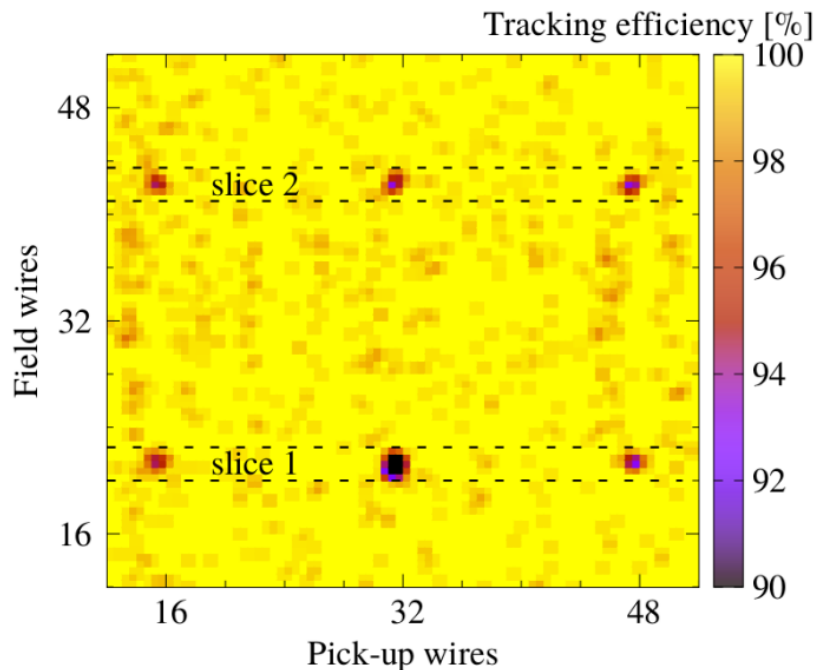


# III. Vulkánok átvilágítása gáztöltésű detektorokkal

# Vulkán átvilágításra optimalizált detektor



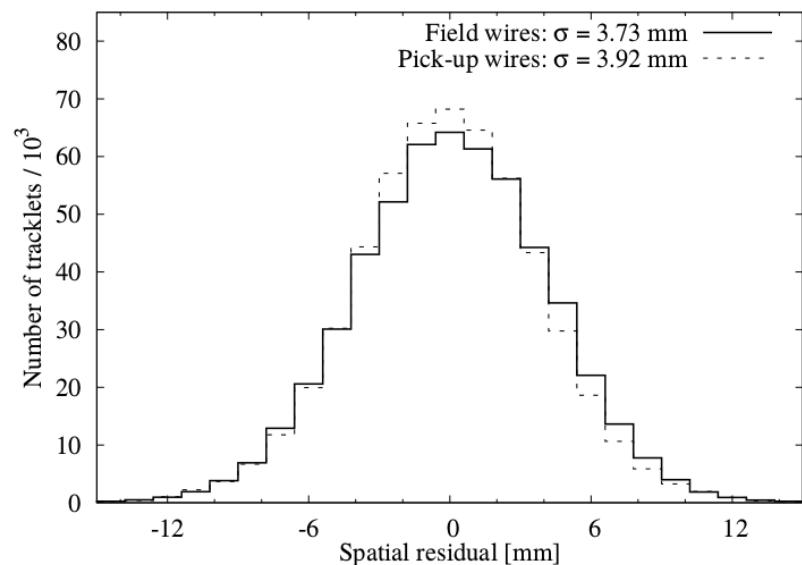
- Vulkán átvilágítás közel horizontális müonokkal: km-es vastagság esetén a müon fluxus:  $\sim 10^{-7}$ - $10^{-6}$  cm<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>
- Cél: olcsó, hordozható moduláris, jó helyfelbontású detektorrendszer fejlesztése
- REGARD Csoport MWPC-alapú (lásd Varga D. előadását) detektorrendszere:
  - Könnyű szerkezetű:  
80 × 80 cm<sup>2</sup> felületű, tömege 6 kg/réteg
  - moduláris és hordozható
  - Alacsony fogyasztású (< 10 W)
  - RPI vezérelt, felhasználóbarát DAQ
- Közel 100 %-os triggerelési és nyomkövetési hatásfok: detektor belső tartóelemei elhanyagolható effektust okoznak



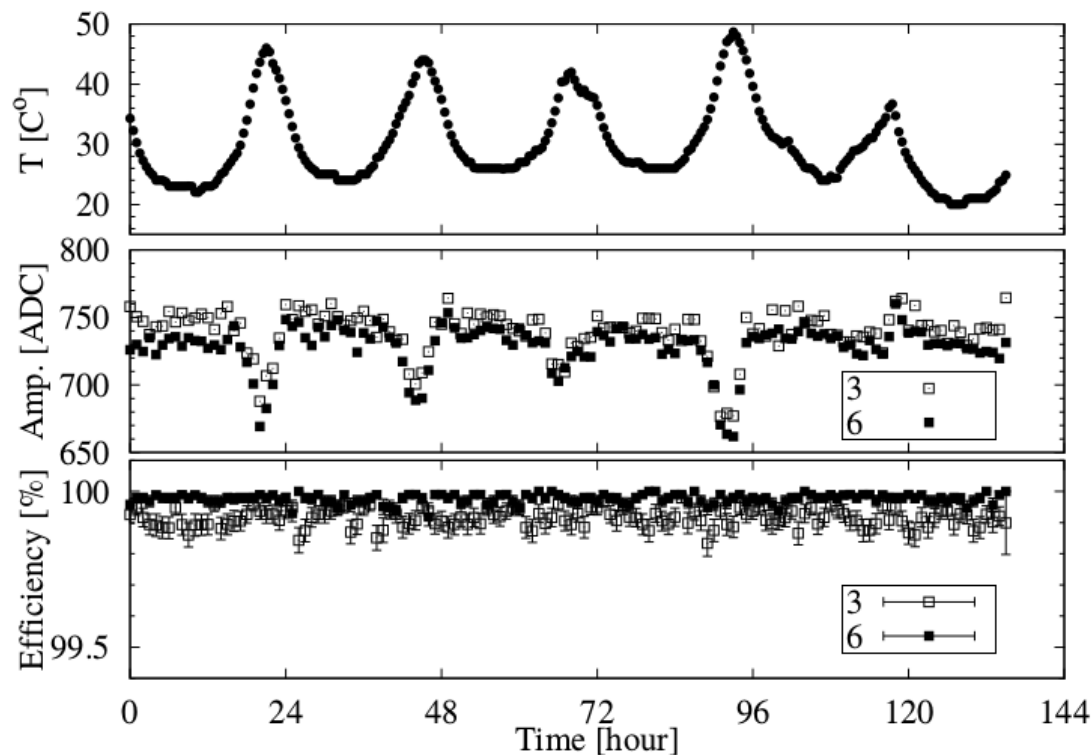
# Vulkán átvilágításra optimalizált detektor

- Ésszerű helyfelbontás: 4 mm
- Szögfelbontás függ a geometriától: 10-15 mrad
- Detektor stabilan, megbízhatóan működik változó környezetben is
- További lépések: detektorok keretbe helyezése az ólom abszorber (10-20  $X_0$ ) rétegekkel együtt, mérések a Sakurajima vulkánnál 2016. októberétől
- Távlati cél:  $\sim 10$  m<sup>2</sup> területű, szállítható detektorrendszerek

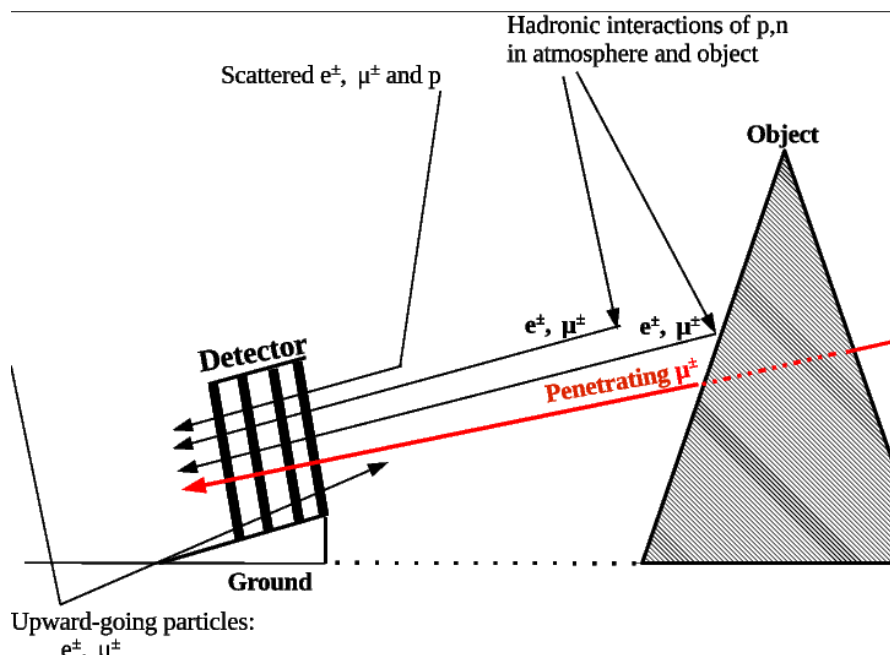
(University of Tokyo és MTA Wigner FK) D. Varga, H. K. M. Tanaka, T. Kusagaya, G. Hamar, L. Oláh:  
**Muographic Observation System, PTZATA153 (Japánban benyújtott szellemi tulajdon)**



Oláh László



# Fizikai háttér vizsgálata, minimalizálása

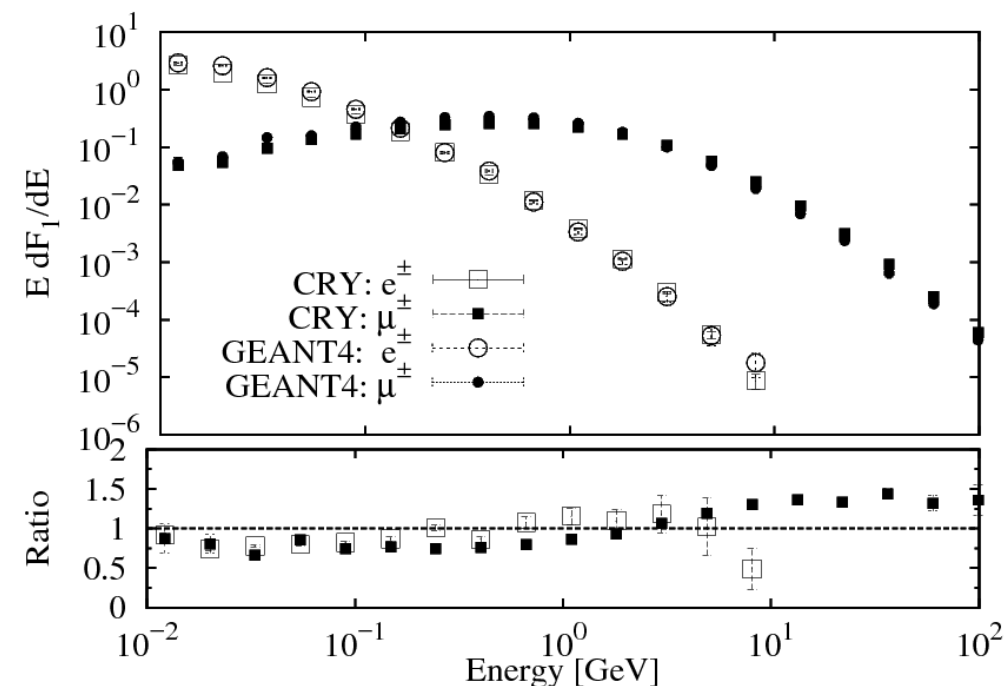


## • Problémák:

- Föld felszínén jelentős háttérrel okoznak a kis energiás ( $< 1$  GeV) müonok és elektronok
- Háttér függ a mérési elrendezéstől, mérés környezetétől

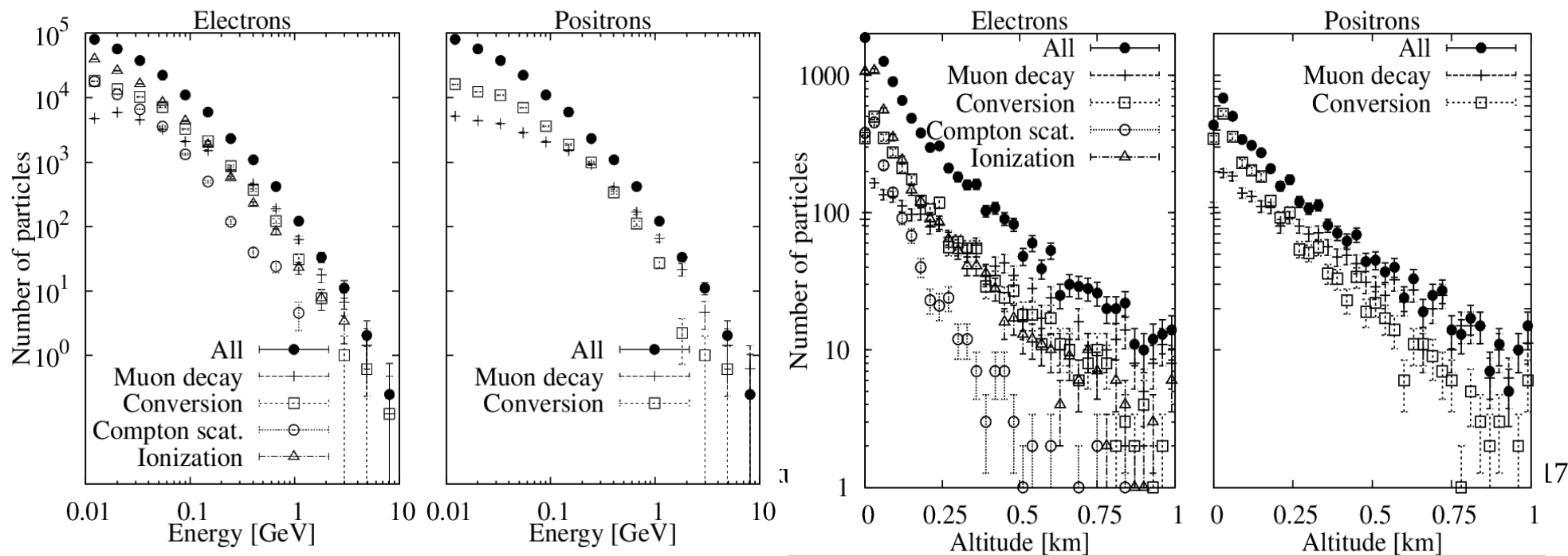
## Cél:

- Föld felszínén a jel/zaj viszony maximalizálása megfelelő detektor elrendezéssel
- Optimalizált szimuláció korrelált részecskezáporokra és müon radiográfiára



# Elektromágneses komponens vizsgálata

- **GEANT4 szimuláció:** S. Agostinelli et al.: NIM A506 (2003) 250-303
  - US1976 légkör modell [http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/us\\_standard.html](http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/us_standard.html)
  - Müonok generálva 6-15 km magasságból  $N(E) \sim E^{-2.7}$  energia-eloszlással
  - Müonok és elektronok követve: azonosítók, energia, momentum és hely információk elmentve
- **EM komponens forrása:**
  - Minden forrás releváns, müonok bomlása jelentős nagyobb energián ( $>0.5$  GeV)
  - Az elektronok (pozitronok) keletkezése: az utolsó 1-1.5 km ( $3-5 X_0$ )



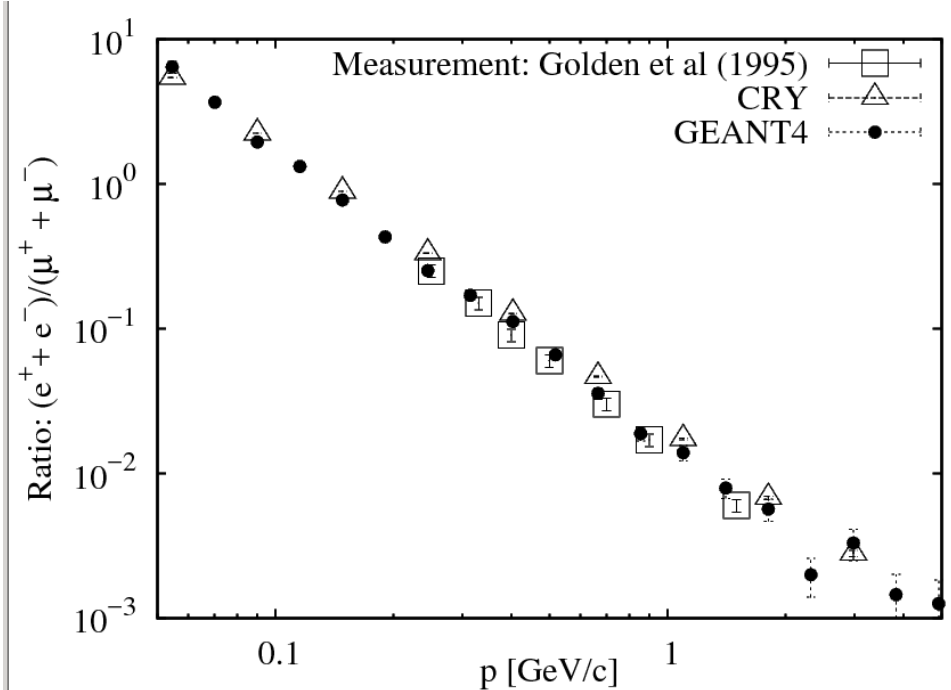
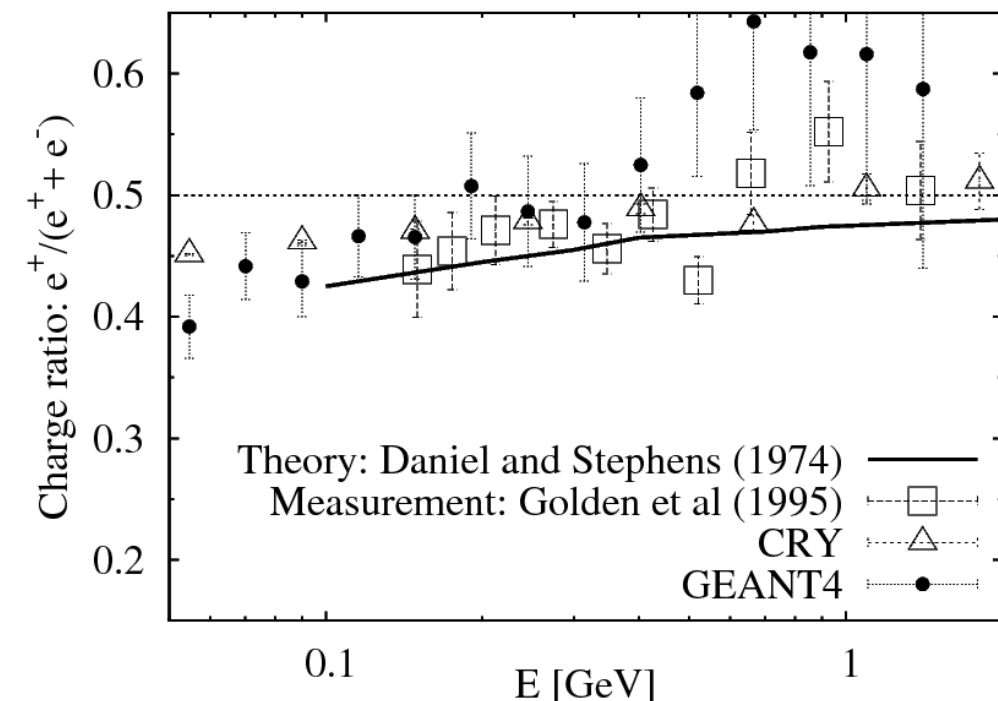
# Spektrumok, részecskearányok

- Spektrumok egyeznek CRY szimulációval
- Elektron-pozitron és elektron-müon arányok egyeznek a korábbi mérések és számolások eredményeivel

Számolás: R. R. Daniel and S. A. Stephens: Rev. Geophys., 233-257, 1974

Mérés: R. Golden et al.: J. Geophys. Res., 100, 515-523, 1995

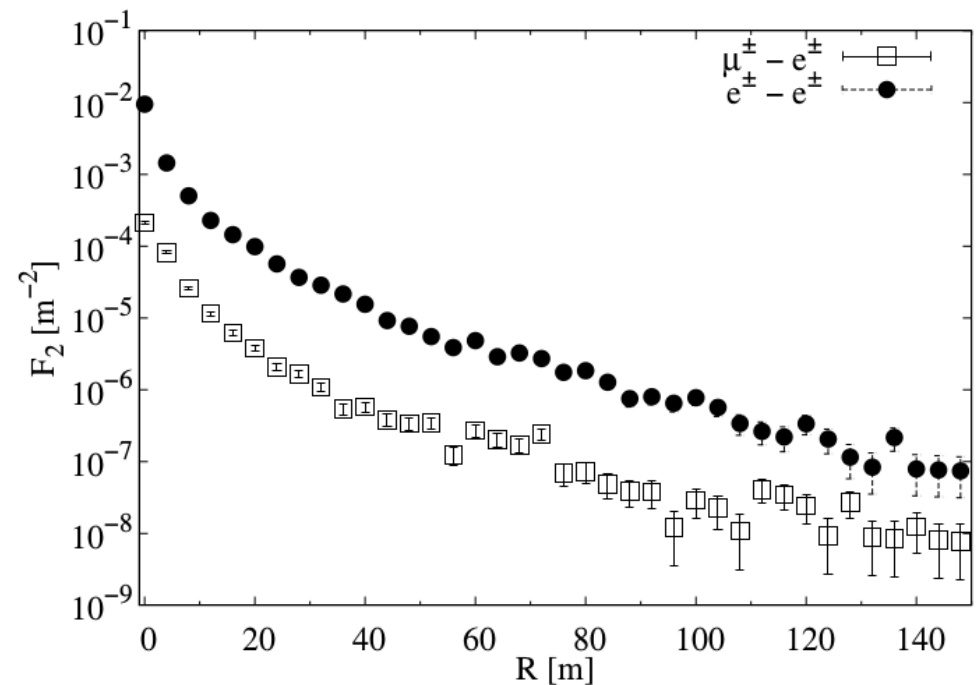
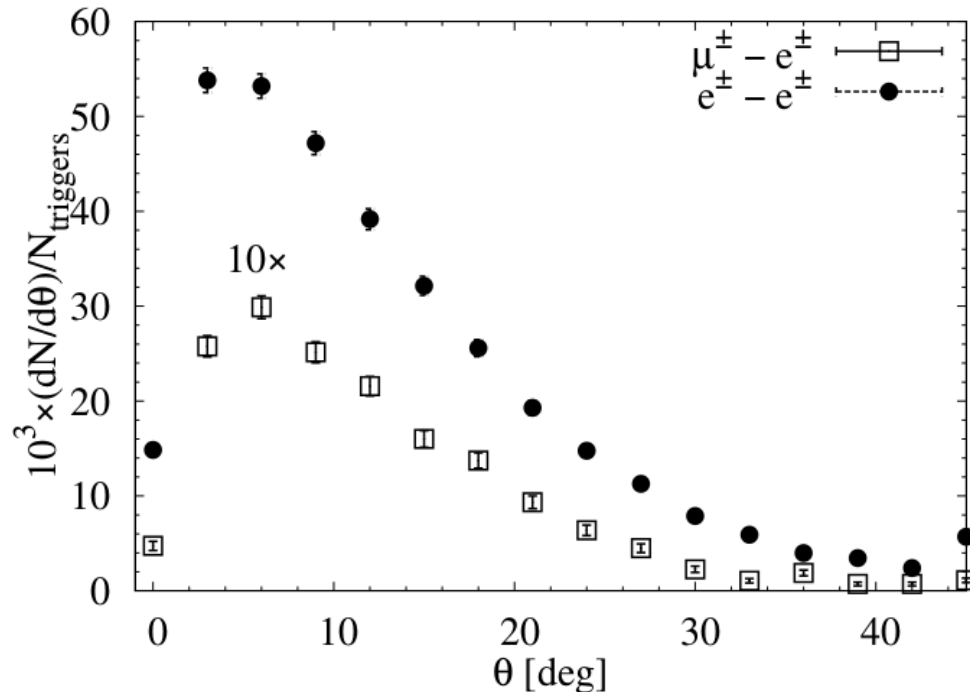
CRY: C. Hagmann et al.: Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec. (2007) 1143-1146



# Részecske-korrelációk

- GEANT4 tartalmazza a releváns fizikai folyamatokat és részecske-korrelációkat is produkál: részecskepárok kis ( $< 25^\circ$ ) zenitszög különbséggel kis távolságra egymástól
- Korrelációk mérések két detektorral: a szimuláció jól közelíti a valóságot
- **Konklúzió:** Realisztikus, korrelált elektromágneses háttér szimulálható 6-15 km-ről indított müonokkal

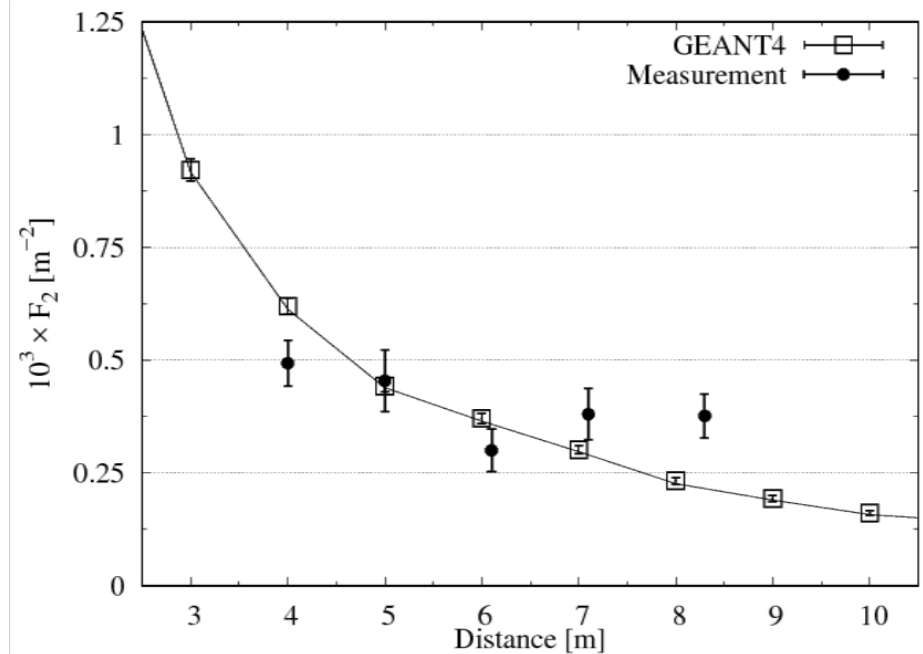
L. Oláh, D. Varga: Investigation of soft component in cosmic muon detection  
(benyújtott publikáció, Astroparticle Physics)



# Részecske-korrelációk

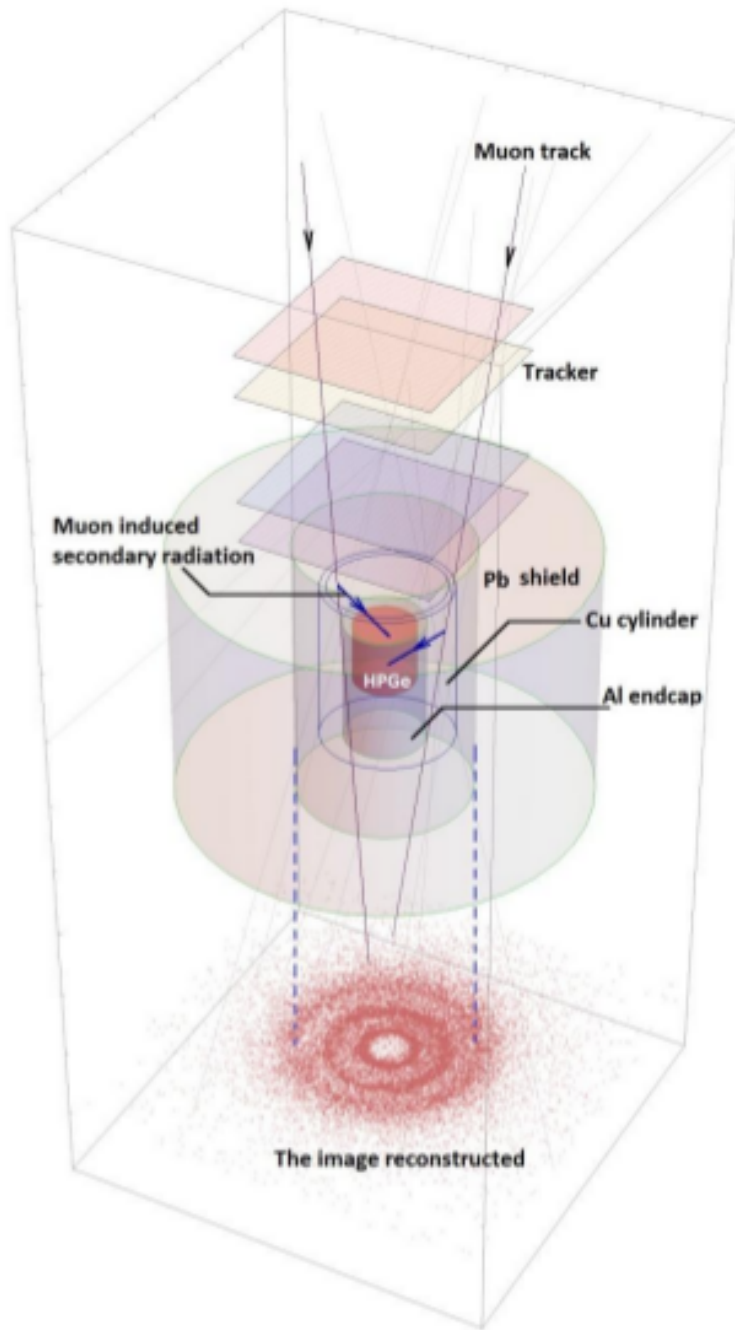
- GEANT4 tartalmazza a releváns fizikai folyamatokat és részecske-korrelációkat is produkál: részecskepárok kis ( $< 25^\circ$ ) zenitszög különbséggel kis távolságra egymástól
- Korrelációk mérések két detektorral: a szimuláció jól közelíti a valóságot
- **Konklúzió:** Realisztikus, korrelált elektromágneses háttér szimulálható 6-15 km-ről indított müonokkal

L. Oláh, D. Varga: Investigation of soft component in cosmic muon detection (benyújtott publikáció, Astroparticle Physics)



# III. Kis sűrűségű anyagok képződése

# Új képalkotási eljárás műon és germánium (HPGE) detektorokkal

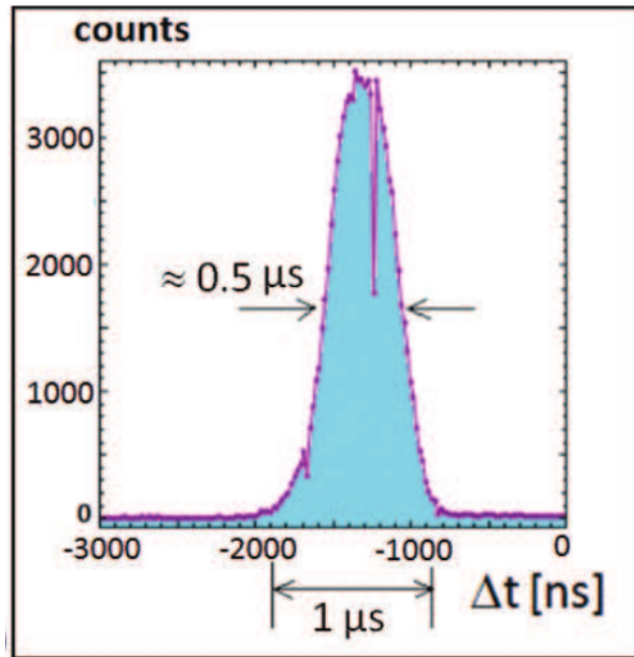


## Működési elv:

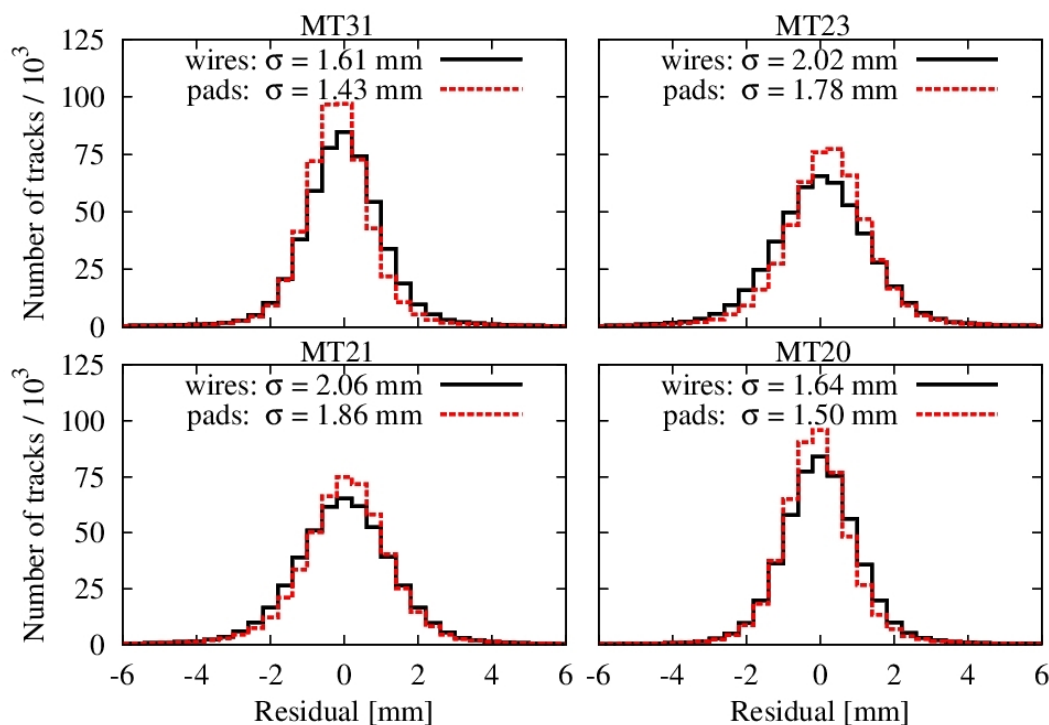
- a müonok által (ionizáció vagy bomlás) keltett másodlagos elektronok kölcsönhatnak a vizsgált mintával, gamma fotonokat kellenek bremstrahlunggal, amelyeket HPGE-vel detektálunk.
- Azok a müonok amelyek a nyomkövető detektor mellett egyidejűleg a HPGE-ben is jelet keltettek képet alkotnak vizsgált, kis sűrűségű mintáról

(Universtity of Novi Sad és MTA Wigner FK)  
I. Bikit, D. Mrdja, K. Bikit, J. Slivka, N. Jovancevic,  
L. Oláh, G. Hamar, D. Varga:  
**European Physics Letters, 113 (2016) 58001**

# A detektorrendszer működése és paraméterei

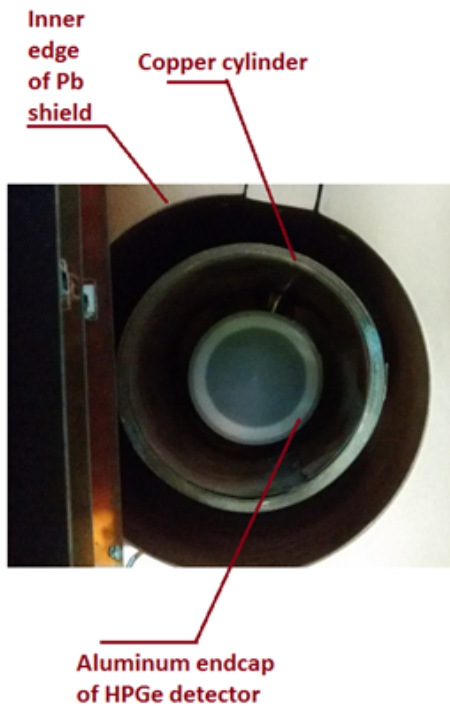


- HPGE detektort a müon detektor triggereli:  $1 \mu s$  időkülönbséggel (FWHM:  $0.5 \mu s$ )
- HPGE-ben 6.4 MeV-es maximum energia (müonok direkt jelét nem vesszük figyelembe)
- Helyfelbontás:  $< 2$  mm
- Detektálási hatások:  $> 95 \%$

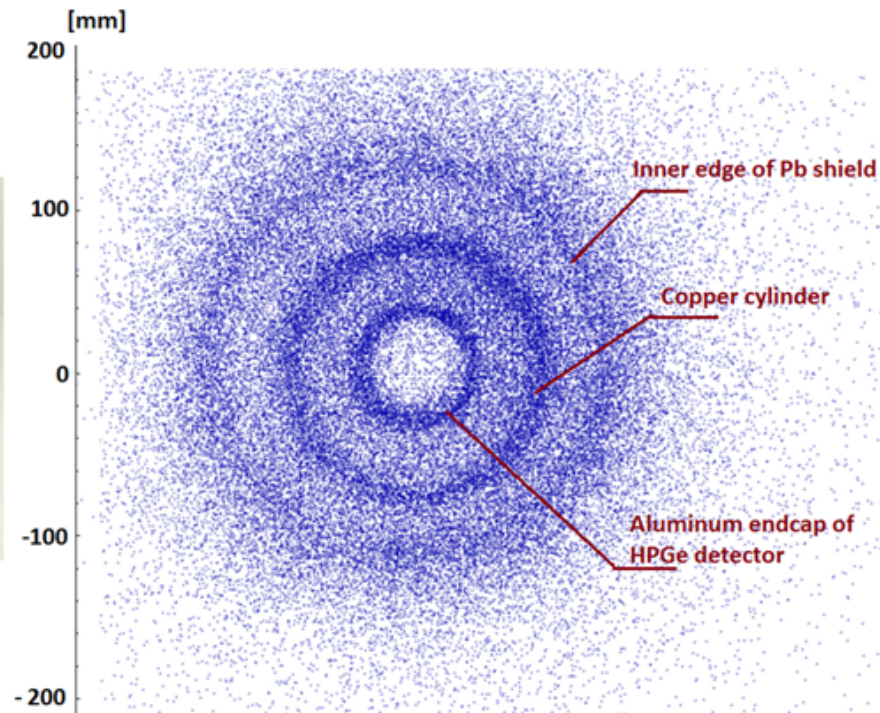


# Az első kép egy réz mintáról

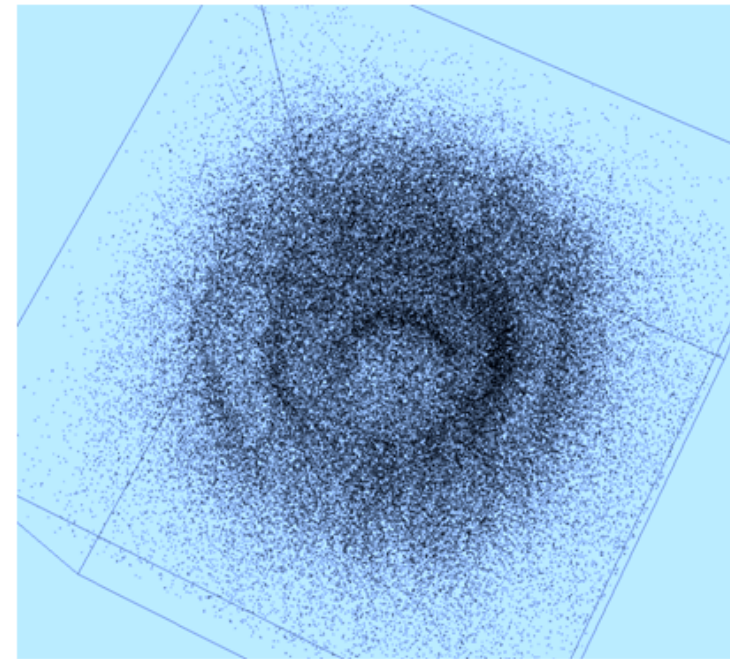
- A minta magasságában található párhozamos síkokra extrapolált részecskepályák koordinátái képet adtak a vizsgált Cu mintáról, a detektor faláról és az árnyékoló Pb árnyékolásról
- A Ge kristály nem leképezhető, mert a müonok jele túl nagy,  $\sim 60$  MeV
- Aktuális mérések célja: kis sűrűségű anyagok azonosítása és megkülönböztetése



a)



b)

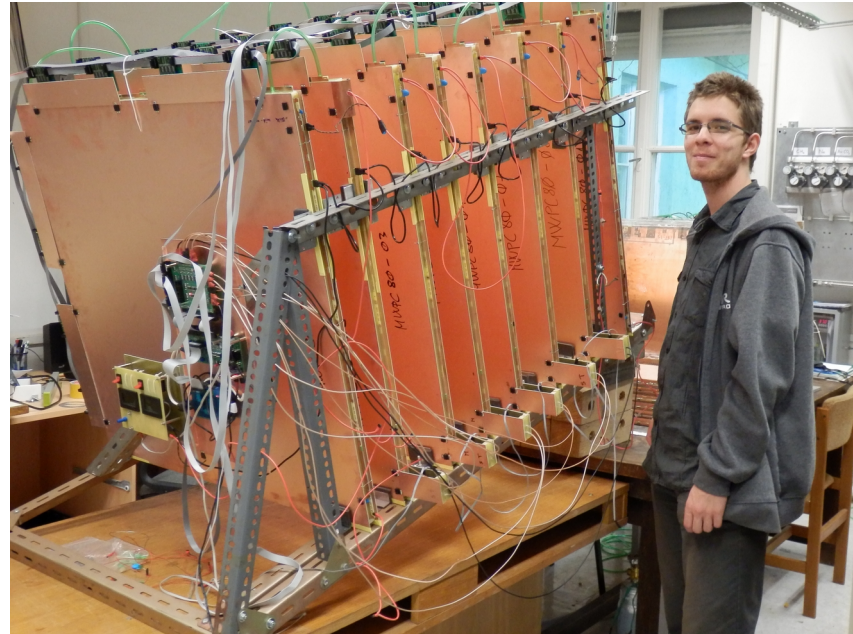


c)

# Összefoglalás

- Kozmikus müonok nyomkövetése ígéretes módszer az alkalmazott kutatásokban: barlangászat, vulkanológia, atomreaktorok monitorozása
- **A REGARD csoport gáztöltésű detektorai müon radiográfiára:**
  - Hordozhatók, alacsony fogyasztásúak (5-10 W)
  - Ésszerű precizitásúak: 2-4 mm hely- és 10-15 mrad szögfelbontás
  - Költséghatékony detektortechnológiák: CCC és MWPC
  - Integrált, felhasználóbarát adatgyűjtő rendszerek
- **A REGARD csoport detektorainak alkalmazásai:**
  - Rejtett föld alatti üregek kutatása
  - Vulkáni tevékenység vizsgálata
  - Kis sűrűségű anyagok azonosítása

# Köszönöm a figyelmet!



**Kutatásainkat az MTA Lendület program (LP2013-60) támogatja.**



# Backup Slides

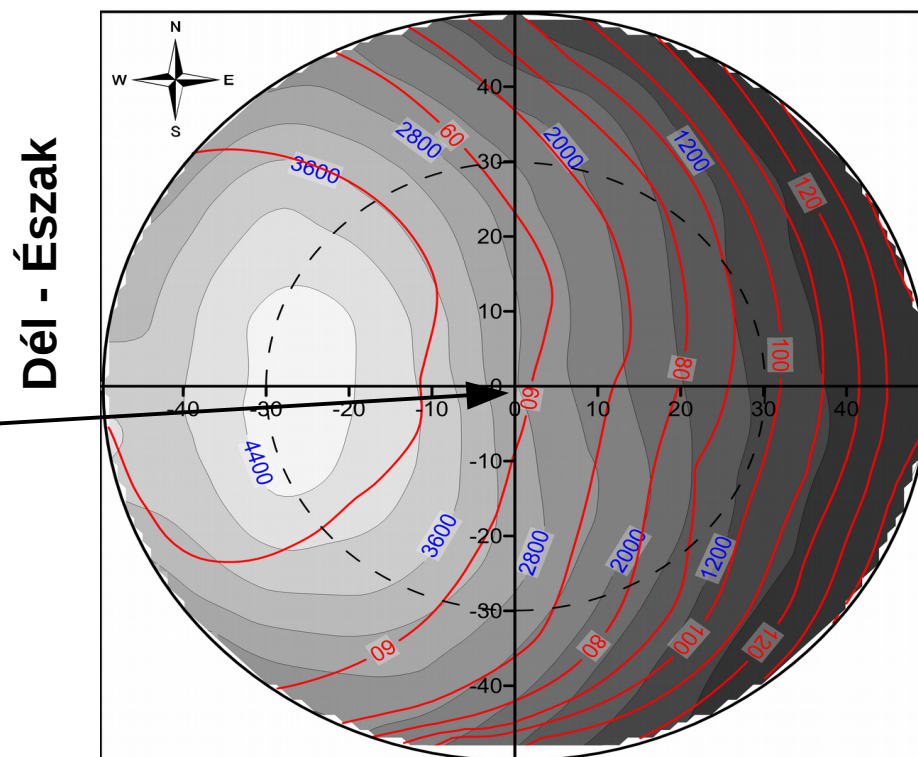
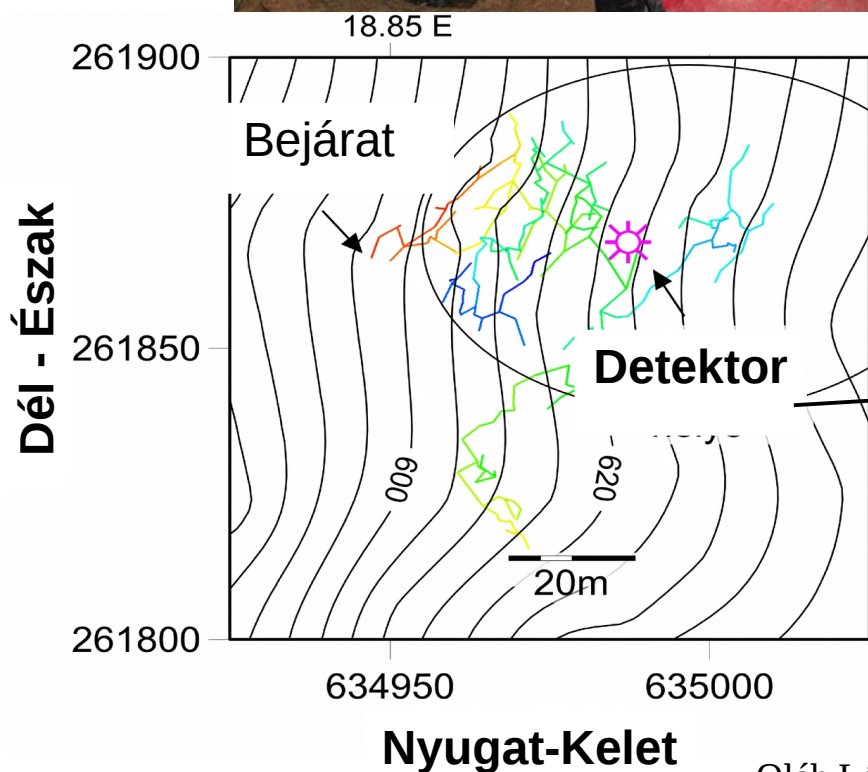
# Első tapasztalatok természetes barlangban



- A detektor első prototípusa megbízhatóan üzemelt az 50 napos mérés során 60 m mélyen az Ajándék-barlangban, Pilis (170k detektált müon)
- **Nincs szignifikáns jele üregnek**

Piros kontúrvonalak: kőzetvastagság (m)

Szürke skálás kontúr: részecskepályák száma



# PIC32-based DAQ system

- **PIC32-based DAQ (developed by H. G. Melegh)**
  - All functions are integrated into a common system plan
  - **Total power consumption:**
    - 380 mA at 12 V: **power < 5 W !!!**
    - Complete unit can operate for more than 5 days with a 50 Ah battery

