



ELTE

FACULTY OF  
SCIENCE

HUN  
REN



# Müográfia: Geofizikai kutatások részecskefizikai módszerekkel

Rábóczki Bence<sup>1,2</sup>,

Hamar Gergő<sup>1</sup>, Oláh László<sup>1</sup>, Surányi Gergely<sup>1</sup>, Balázs László<sup>1,2</sup>

1: HUN-REN Wigner FK., Nagyenergiás Fizikai Osztály

2: ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

Fizikushallgatók Tudományos Találkozója 2024 - Budapest

# Tartalomjegyzék

---

1. Bevezetés - mi is az a müográfia?
2. Bevezetés - a müonokról röviden
3. Mérési módszerek
4. Müogram készítése  
(méréskiértékelés)
5. Geofizikai inverzió
6. Témalehetőségek

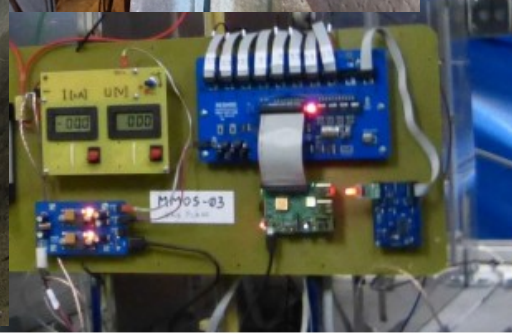
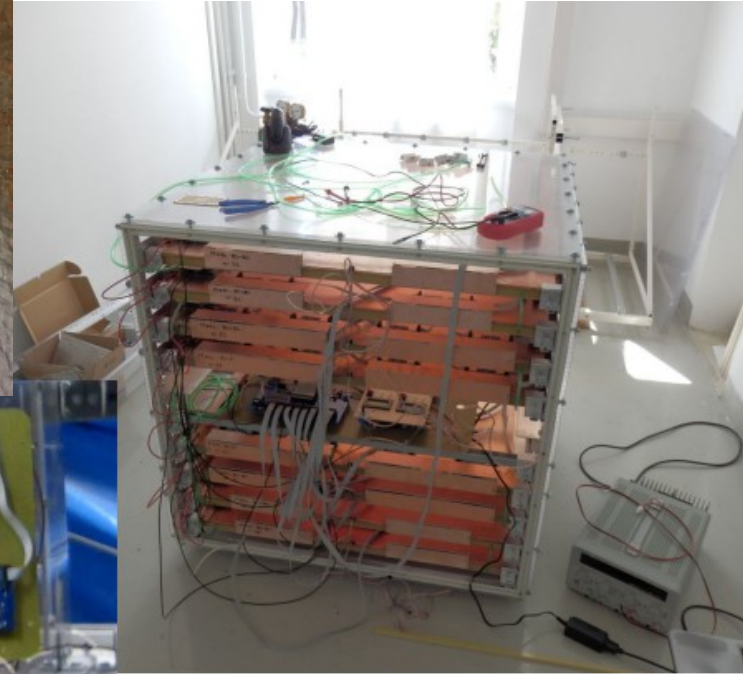
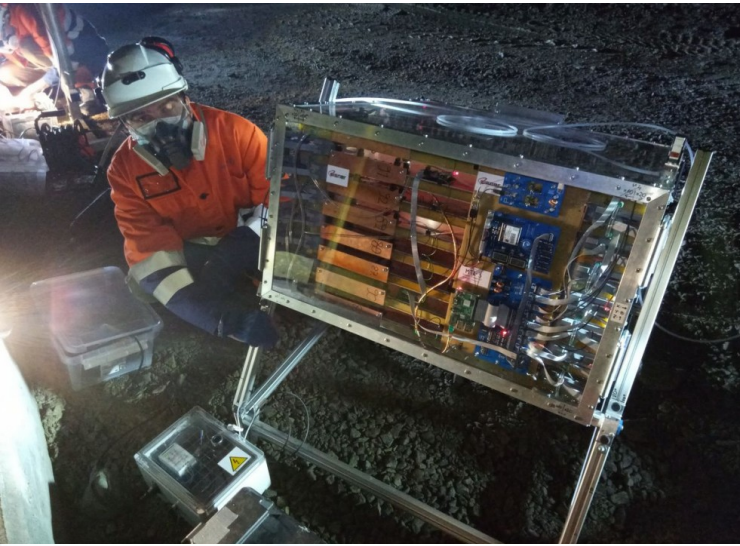
# Bevezetés – mi is az a müográfia?

---

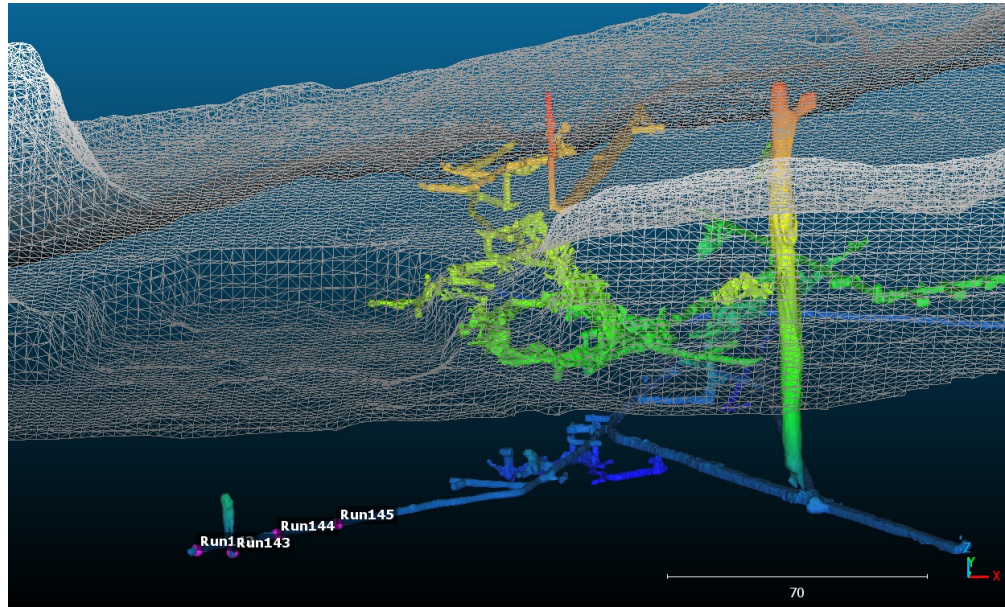
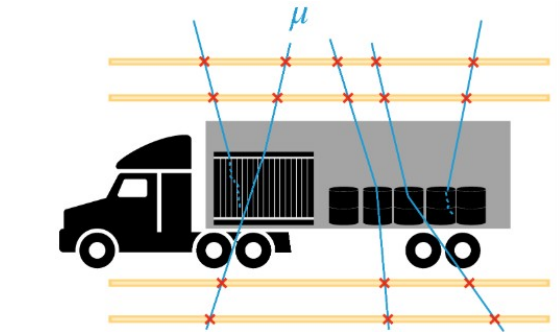
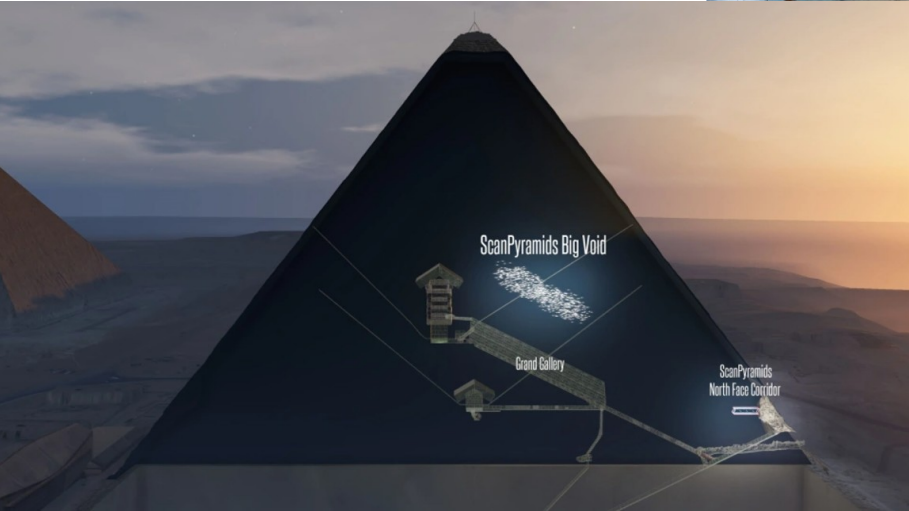
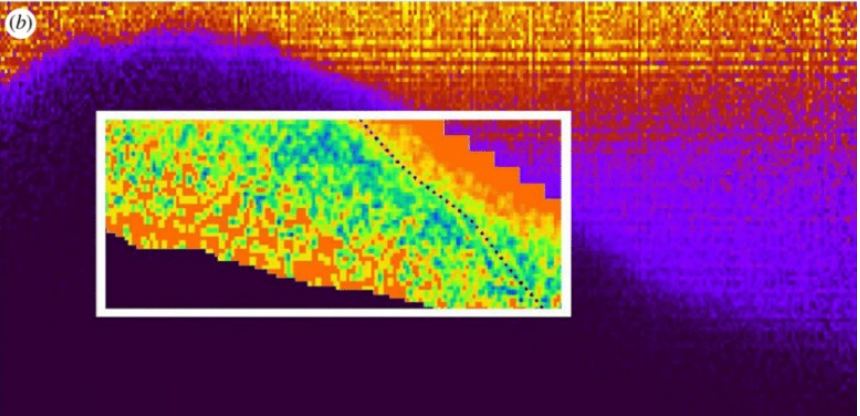
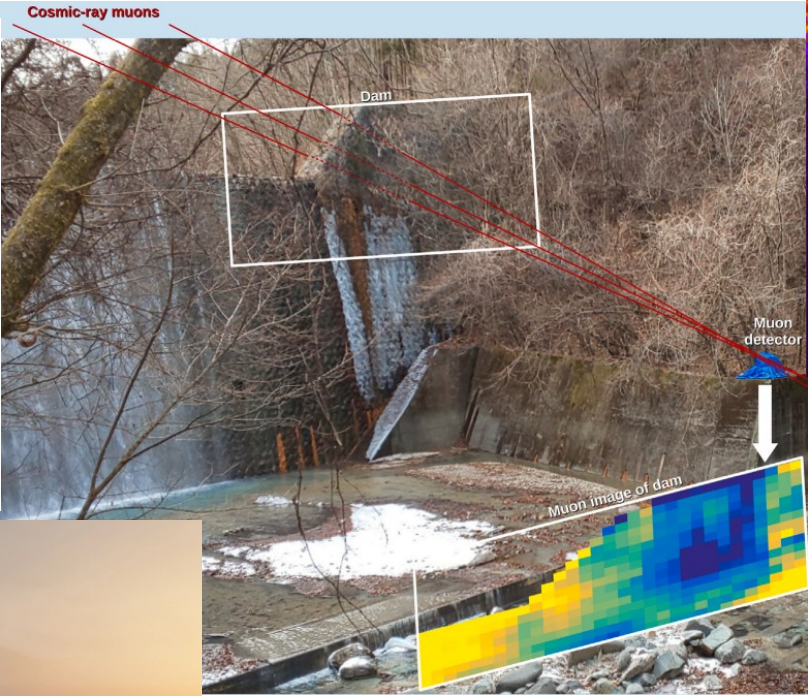
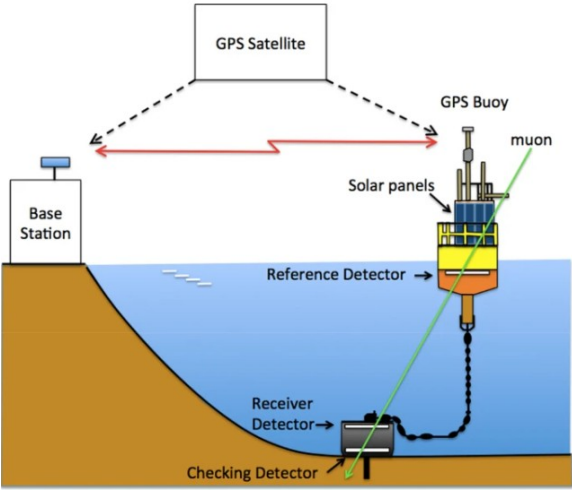
*A müográfia egy dinamikusan fejlődő kutatási terület, melynek célja a nagyenergiás részecskefizika eszközeit felhasználni geofizikai területeken. A módszer a kozmikus müonsugárzás elméleti és gyakorlatban mért fluxusának különbségéből enged következtetni nagy kiterjedésű, müográf detektor előtt elhelyezkedő objektumok (például vulkánok, hegyek, piramisok, gátak) belső sűrűségeloszlására.*

- **Felszíni müográfia:** vulkánkutatás, piramiskutatás, ipari szerkezetvizsgálat
- **Felszín alatti müográfia:** piramiskutatás, érckutatás, üregkutatás, geológiai kutatás
- **Alternatív müográfia:** border security, anyagvizsgálat másodlagos részecskékkel, muon positioning

# Bevezetés - mi is az a müográfia?

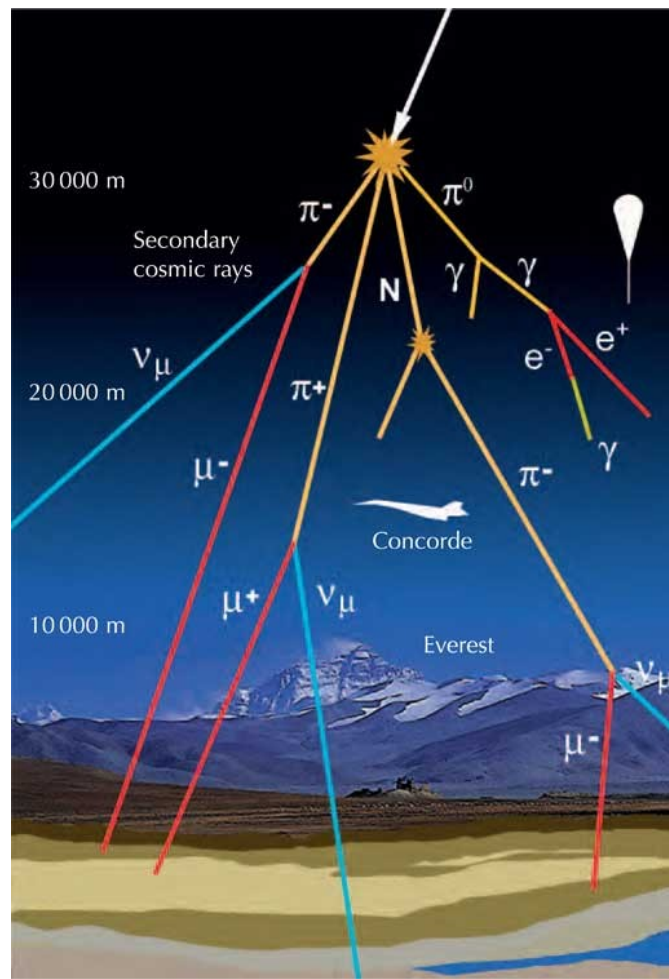


# Bevezetés - mi is az a müográfia?



# Bevezetés - a kozmikus háttérsugárzás és a müonok

- Forrás: főként extragalaktikus protonok → **időben állandó fluxus** (szoláris és galaktikus események nem befolyásolják)
- A felszínen mért müonok **keletkezési helye a felsőlégkör**
- A müon az „elektron nagy testvére” (nagy tömeg, -1 töltés)
- 2.2 ms élettartam → (pár km után elbomlanának → relativitáselmélet)
- Felszíni átlagos energia: 4 GeV → **jó átható képesség**
- Felszíni átlagos fluxus: kb 1 db percenként egy négyzetcentiméteren



Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III		
tömeg →	2,3 MeV/c <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	173 GeV/c <sup>2</sup>	0	125 GeV/c <sup>2</sup>
töltés →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
név →	<b>u</b> u-kvark	<b>c</b> c-kvark	<b>t</b> t-kvark	<b>γ</b> foton	<b>H</b> Higgs-bozon
<b>kvarkok</b>	4,8 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>d</b> d-kvark	95 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>s</b> s-kvark	4,2 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>b</b> b-kvark	0 0 1 <b>g</b> gluon	
<b>Leptonok</b>	<2,2 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> elektron-neutrínó	<0,17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> müon-neutrínó	<15,5 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> tau-neutrínó	91,2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z-bozon	
	0,511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>e</b> elektron	105,7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>μ</b> müon	1,777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>τ</b> tau	80,4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> W-bozon	<b>Bozonok (kölsönhatások)</b>

# Bevezetés - a müonok fontos tulajdonságai

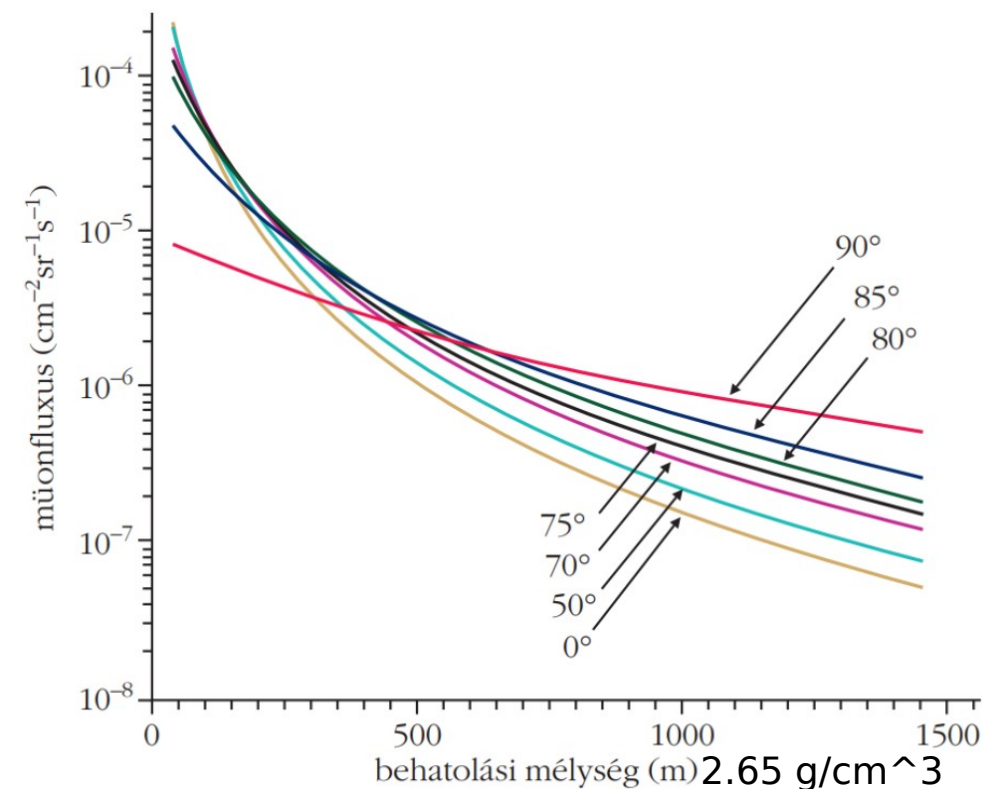
Energiaveszteség várható értéke  $\langle -\frac{dE}{dx} \rangle$  úthosszon leírható a Bethe-Bloch egyenlettel:

$$\langle -\frac{dE}{dx} \rangle = K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 Q_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} + \frac{1}{8} \frac{Q_{max}^2}{(\gamma M c^2)^2} \right] + \Delta \left| \frac{dE}{dx} \right|$$

Makroszkópikus skálán az energiaveszteség a megtett úthosszal és az úthossz menti sűrűséggel arányos:

$$\langle -dE/dx \rangle \sim L$$

$$\langle -dE/dx \rangle \sim \rho$$

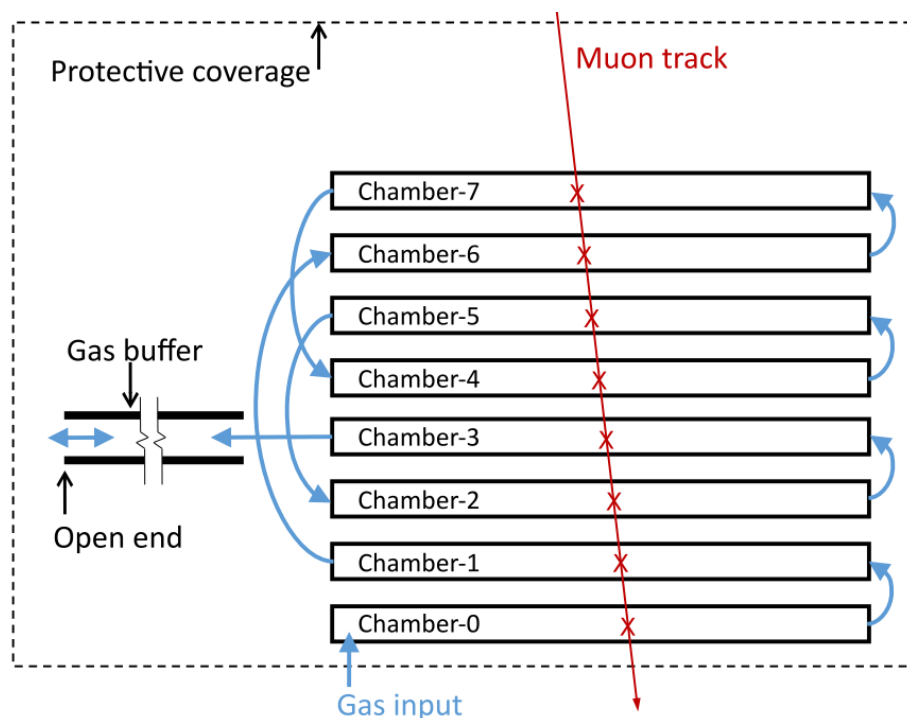


# Mérési módszerek - a müonok detektálása

- **Töltött részecske** → jól detektálható
- Általunk alkalmazott technológia: **MWPC** (sokszálas kamra)
- **Ionizálható gázkeverékkel** (Ar-CO<sub>2</sub>) töltött kamrában **nagyfeszültségű vezetékek** X és Y irányban
- Áthaladó müon **elektronlavinát** kelt a szálak közelében → kiolvasó elektronika rögzíti a koordinátáit
- Több kamrával rögzítjük a Z koordinátát → **rekonstruálható a három dimenziós müonpálya**
- Detektor feletti, kvázi kúp alakú területen áthaladó müonokat mérhetünk (~100° nyílásszög)

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu(\bar{\nu}) (\sim 100\%)$$

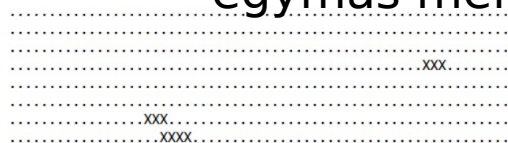
$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu(\bar{\nu}) (\sim 63.5\%)$$



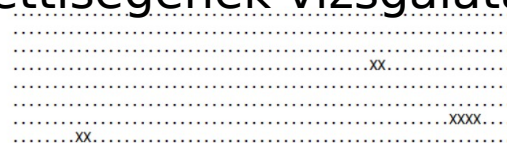
# Mérési módszerek - adatszűrés

- A detektor minden töltött részecskét detektál → **ki kell szűrni a müonokat**
- Mérési idő: hetek, hónapok (**sok adat**)
- **Metaadatok** segítenek: detektor hatásfok, nagyfeszültség érték → elsődleges szűrés
- Alfa sugárzás: nem hatol be
- Béta sugárzás: behatolhat, 1 kamrában ionizálhat (baj, ha pont müon áthaladással egyszerre)
- Gamma sugárzás: behatol, Compton/fotoeffektuson keresztül gerjeszt → szűrni kell
- Áthaladó müon másodlagos részecskét, úgynevezett delta elektront kelthet

Random események **hamis tracket** generálhatnak. Öt kamra felett a hamis trackek száma elhanyagolható, a gerjesztések szűrhetők **klaszterezéssel** (triggerek egymás mellettségének vizsgálatával)

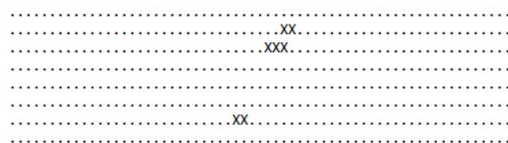


padek x koordinátában

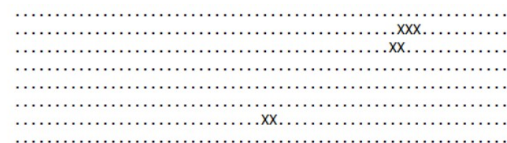


padek y koordinátában

Random beütés  
egy időpontban

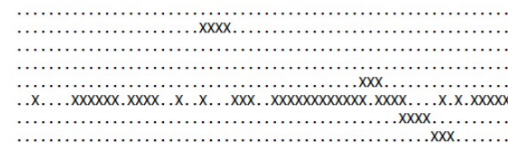


padek x koordinátában

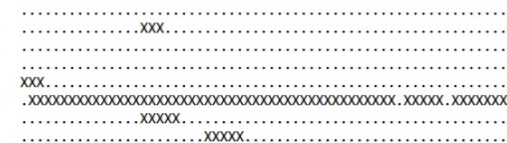


padek y koordinátában

Hamis track  
(egyenes, de nem minden kamrán)



padek x koordinátában

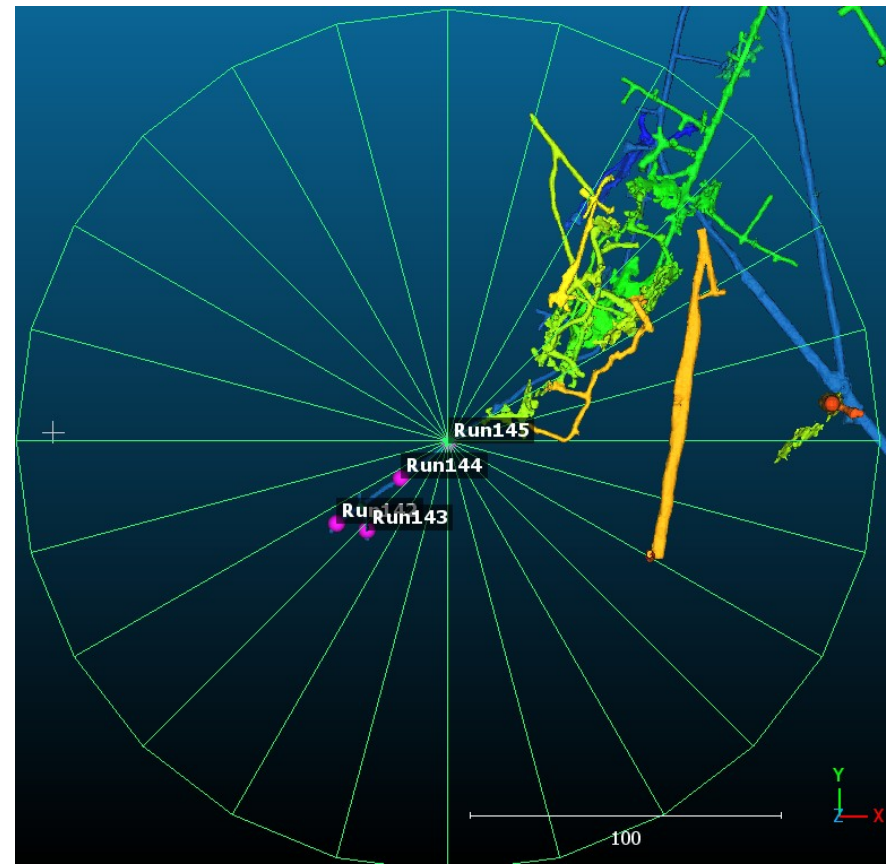
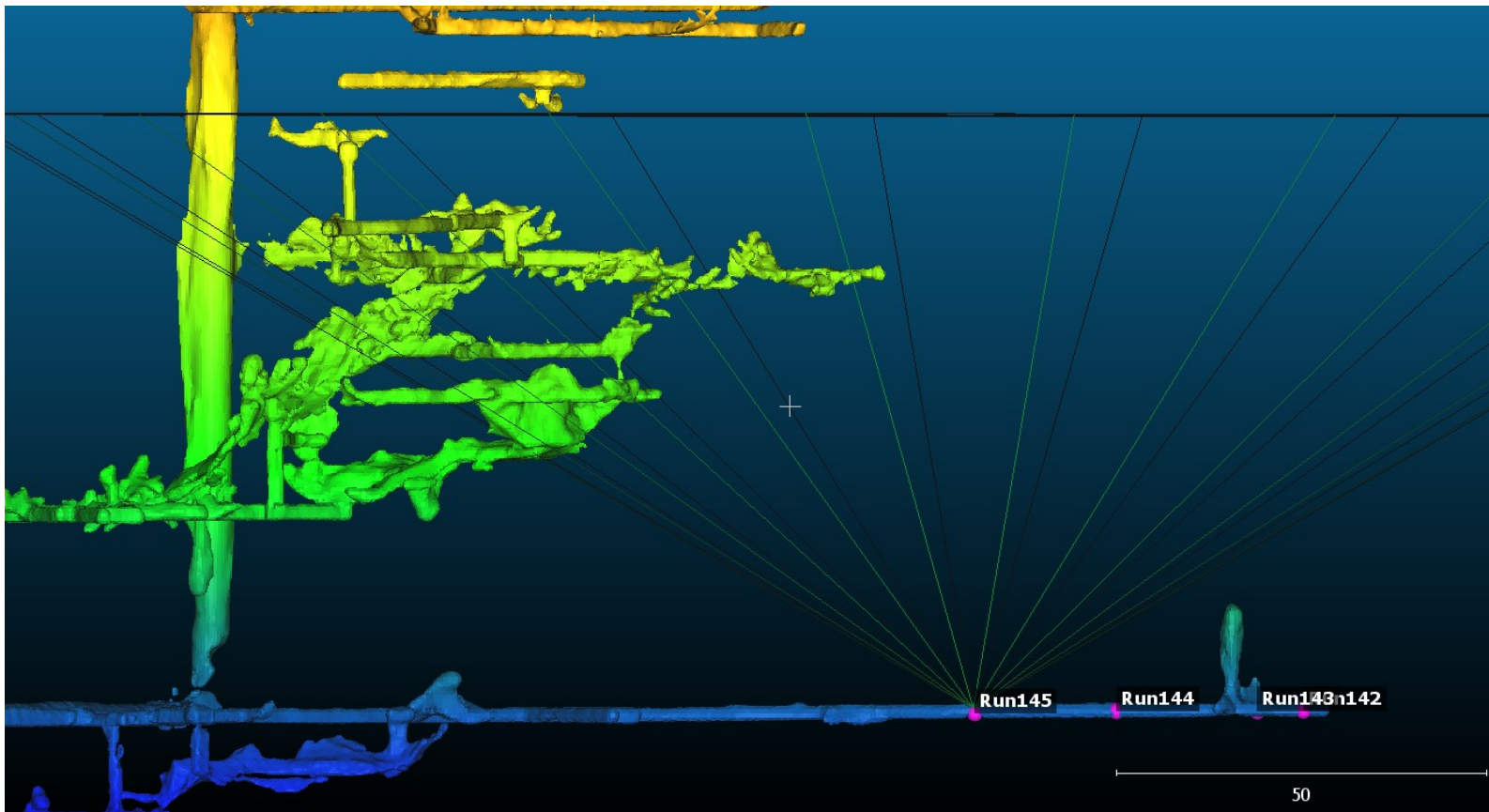


padek y koordinátában

Delta elektron

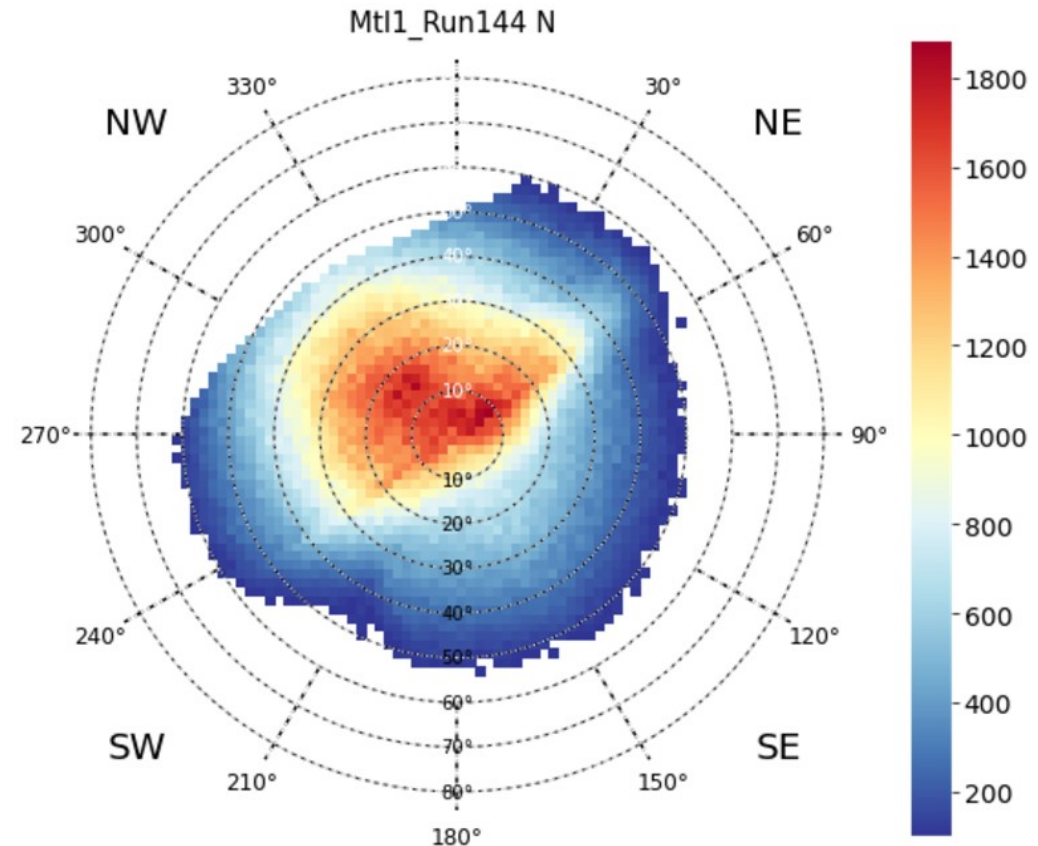
# Müogram készítése - az átvilágított terület geometriája

- Példa: esztramos-hegyi vasércbánya



# Müogram készítése - beütésszám

- Zenitszög: függőlegessel bezárt szög
- Azimutszög: északkal bezárt szög
- a számításokhoz a teret binekre osztjuk, bennük homogénnek tekintjük a teret
- Most, hogy elkészült a szűrt adatrendszerünk ábrázolhatjuk a beütésszámot az egyes irányokból



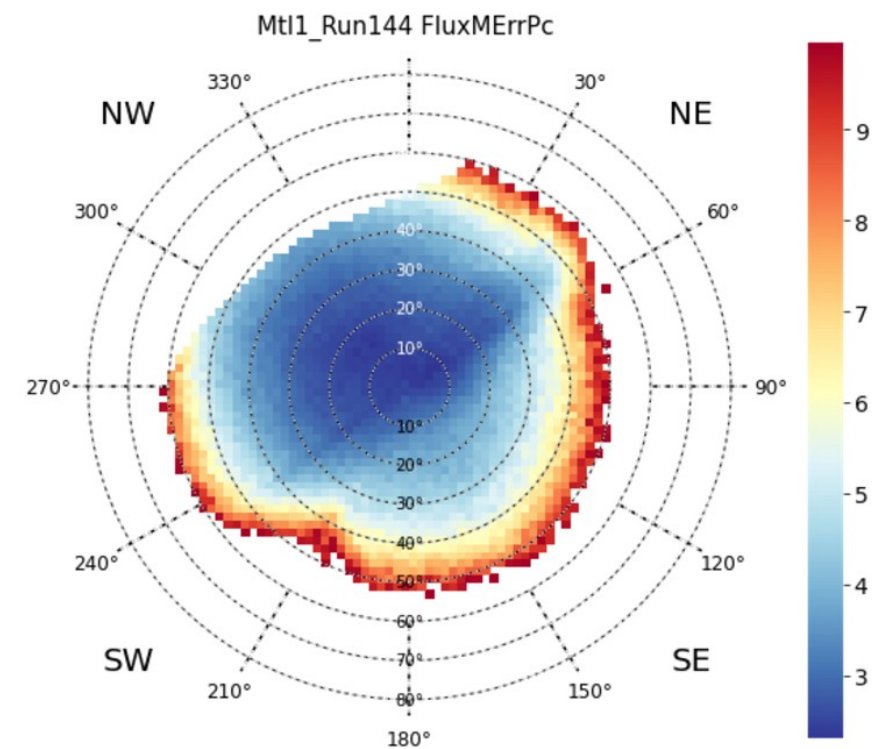
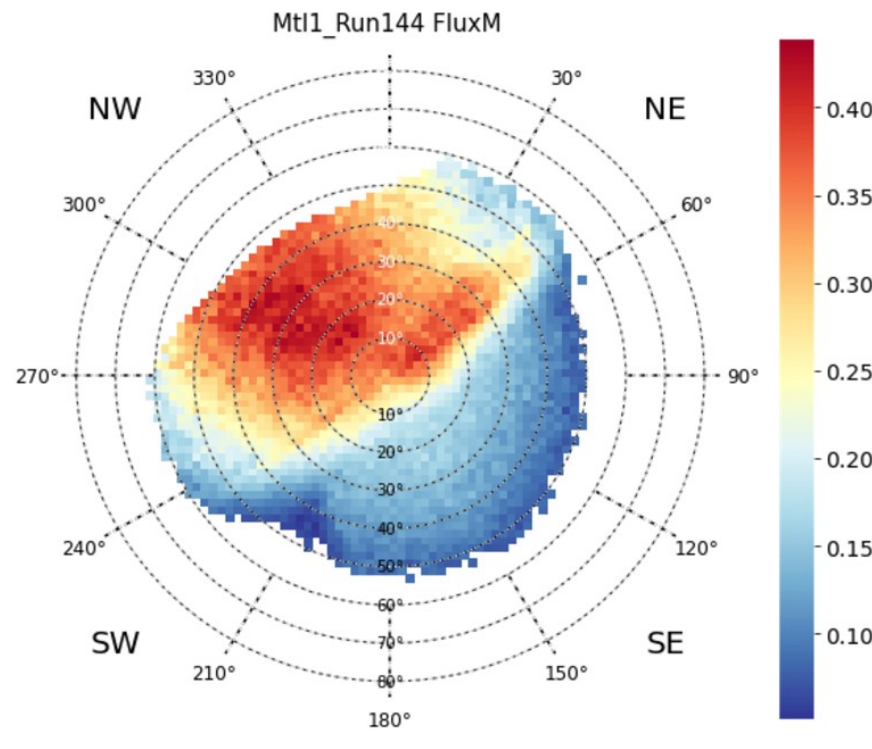
# Müogram készítése - fluxus

- Fluxusszámításhoz szükséges:  
beütésszám,  
detektorfelület, zenitsző  
hatásfok, idő

$$\varphi = \frac{N}{A \cdot \theta \cdot \epsilon \cdot t}$$

$[m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot s^{-1}]$

- Bizonytalanság az  
eseményszám  
négyzetgyökével arányos



# Müogram készítése - sűrűséghossz

- A detektorba való eljutáshoz a müon kell, hogy rendelkezzen egy **minimum kezdeti energiával**

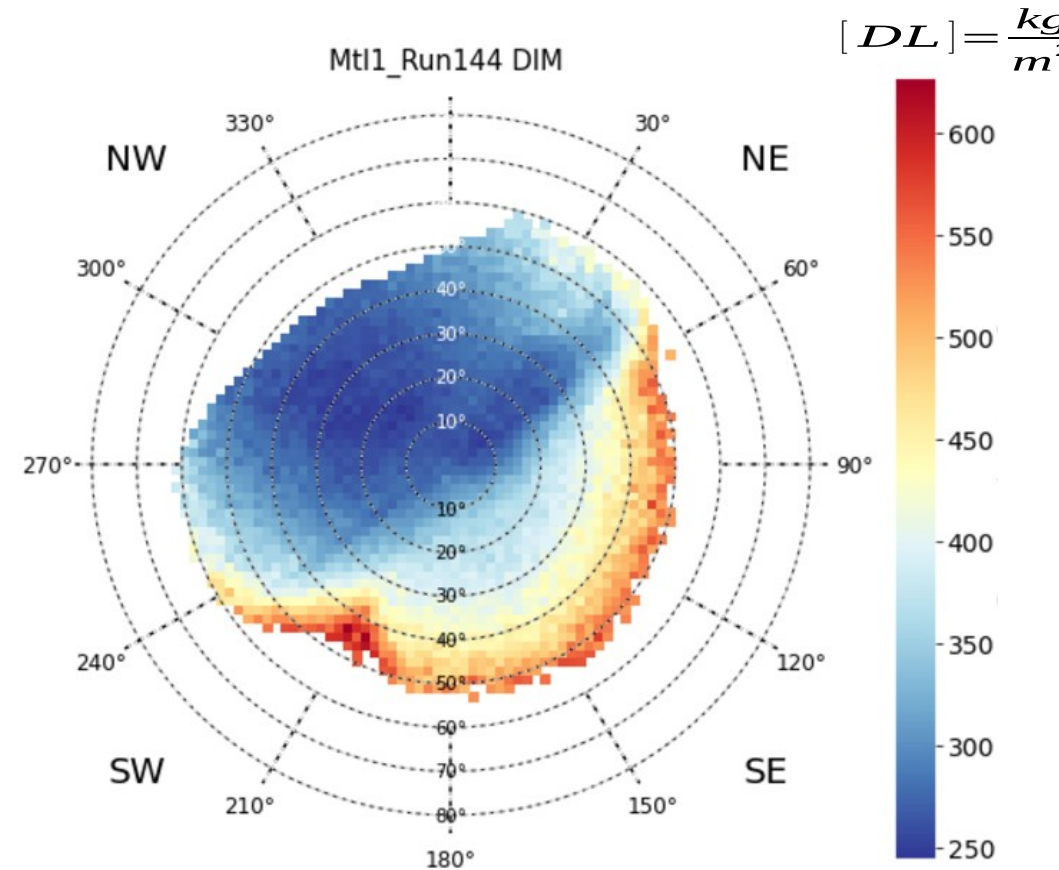
$$E_{min} = E_{\mu} + \int_0^{\varrho} \frac{dE}{d\varrho} d\varrho \longrightarrow \Phi(\varrho, \theta) = \int_{E_{min}(\varrho)}^{\infty} \varphi(E_0, \theta) dE_0$$

- Integrált müonfluxus:** időegység alatt a kőzeten áthaladni képes müonok száma a sűrűséghossz függvényében ( $E_{min}$  keresztül)  $\rightarrow$  **referencia energia spektrummal** már számítható lesz a sűrűséghossz alapján:

$$\frac{d\Phi}{dE_{\mu}} = 0.14 \left[ \frac{E_{\mu}}{\text{GeV}} \left( 1 + \frac{3.64 \text{ GeV}}{E_{\mu} (\cos\theta^*)^{1.29}} \right) \right]^{-2.7} \times \left[ \frac{1}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos\theta^*}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos\theta^*}{850 \text{ GeV}}} \right]$$

$$\theta^* = \sqrt{\frac{(\cos\theta)^2 + P_1^2 + P_2(\cos\theta)^{P_3} + P_4 \cos(\theta)^{P_5}}{1 + P_1^2 + P_2 + P_4}}$$

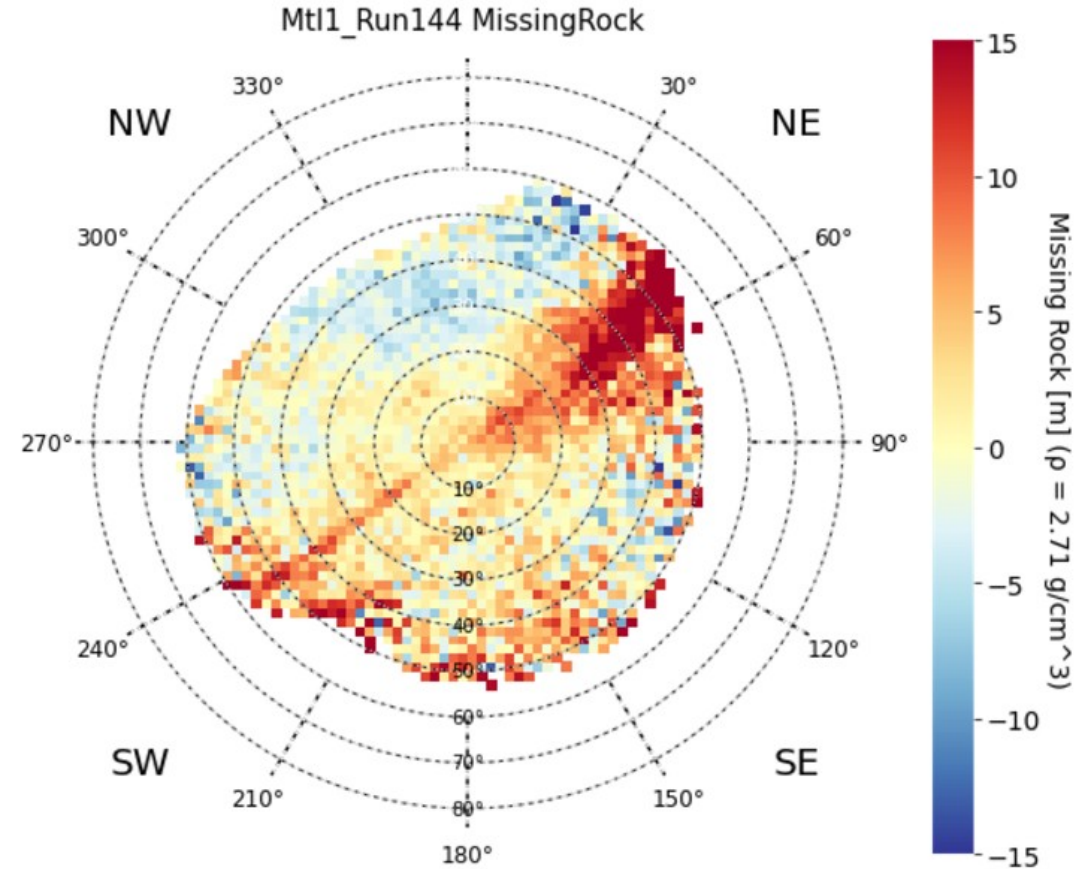
$P_1 = 0.102573, P_2 = -0.068287,$   
 $P_3 = 0.958633, P_4 = 0.0407253$   
 $P_5 = 0.817285$



# Müogram készítése - közethiány

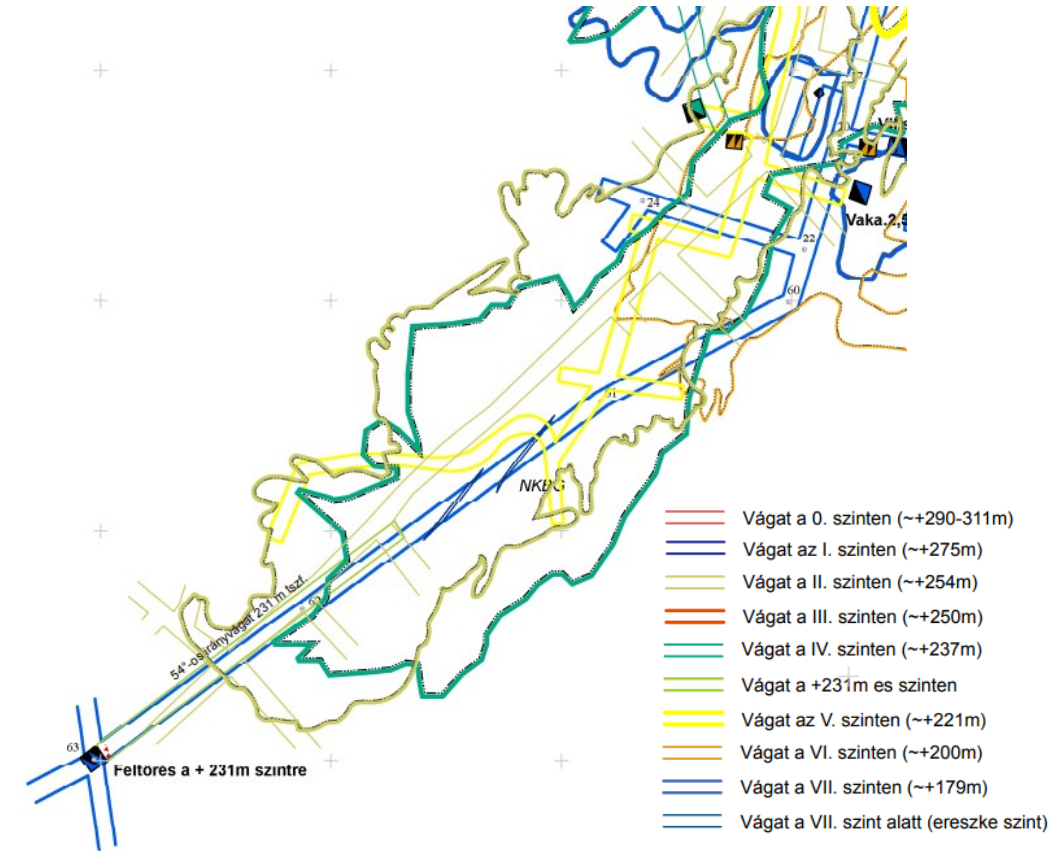
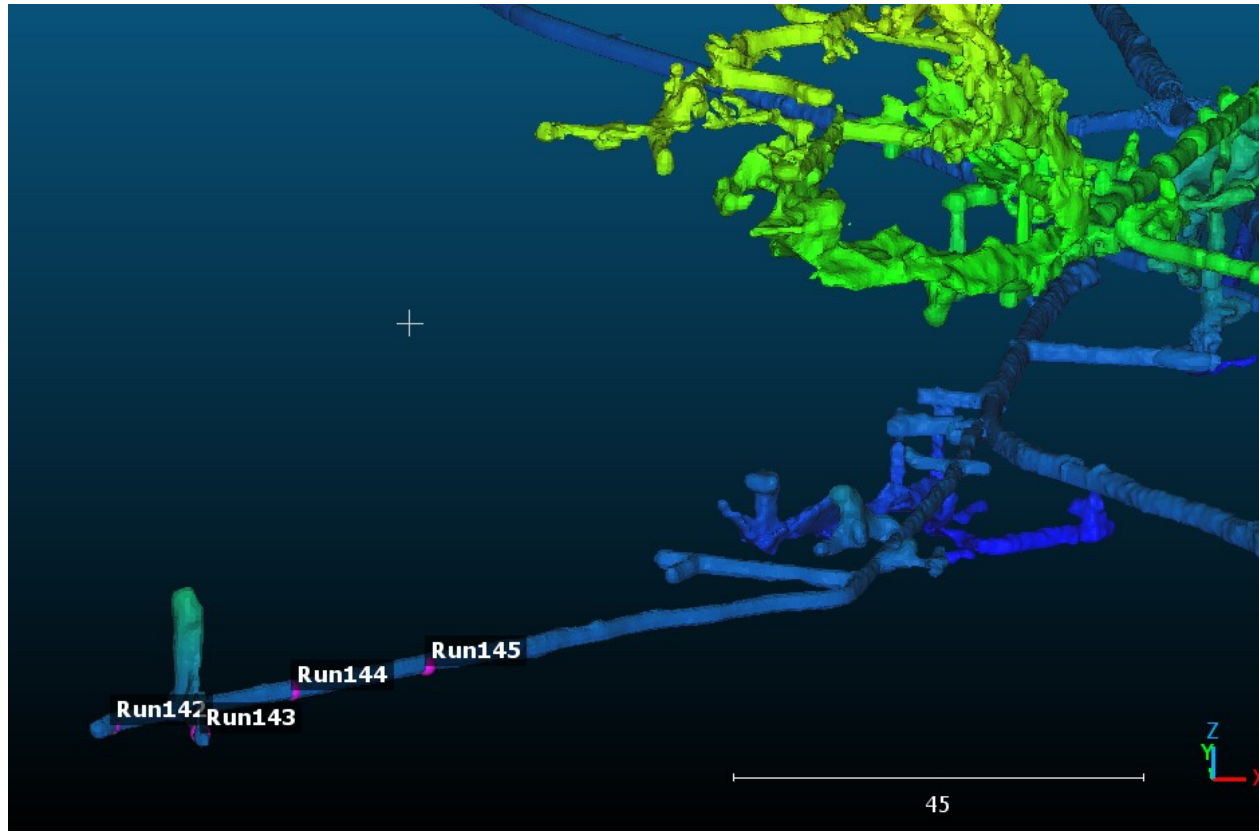
- A mért sűrűség hosszát elosztva a helyi **kőzet átlagsűrűségével** megkapható az egyes irányok mentén mért kőzetmennyiség („közethossz”) méterben
- Az **elméleti értéke is számítható**, ha a detektor pozíciójától a felszínig mért távolságot meghatározzuk
- A mért és az elméleti közethossz különbsége a **közethiány**

$$MR = R L_{elméleti} - R L_{mért} = m$$



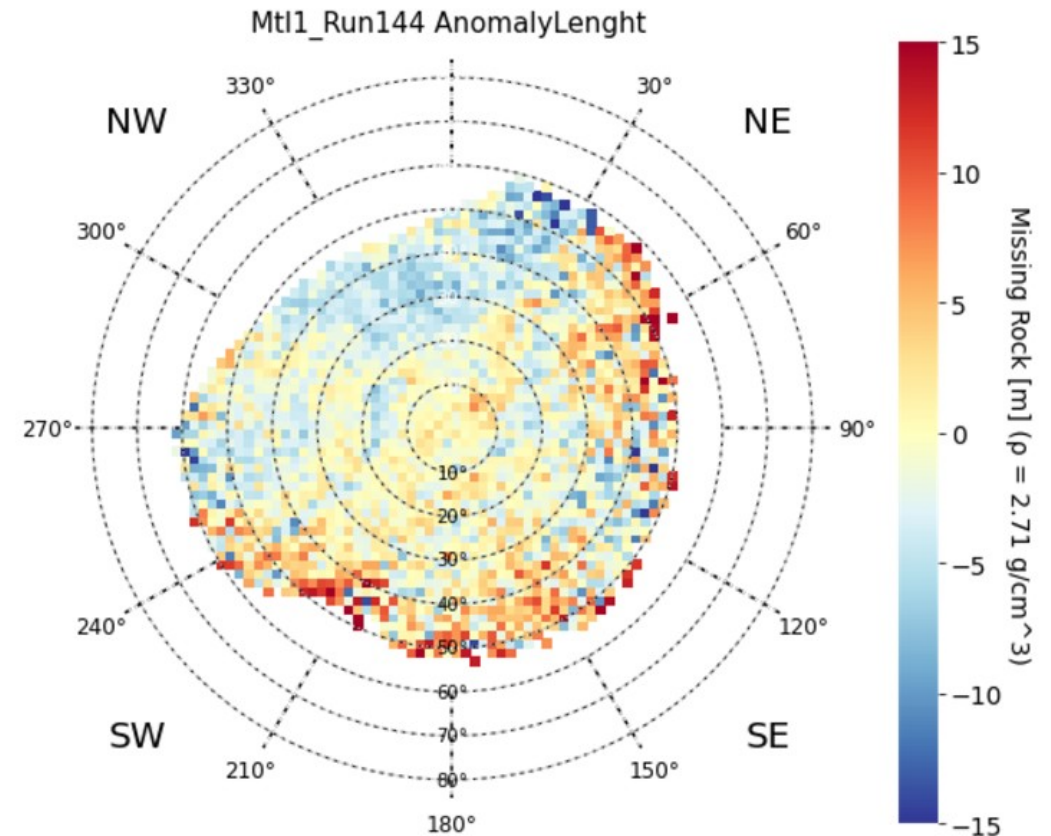
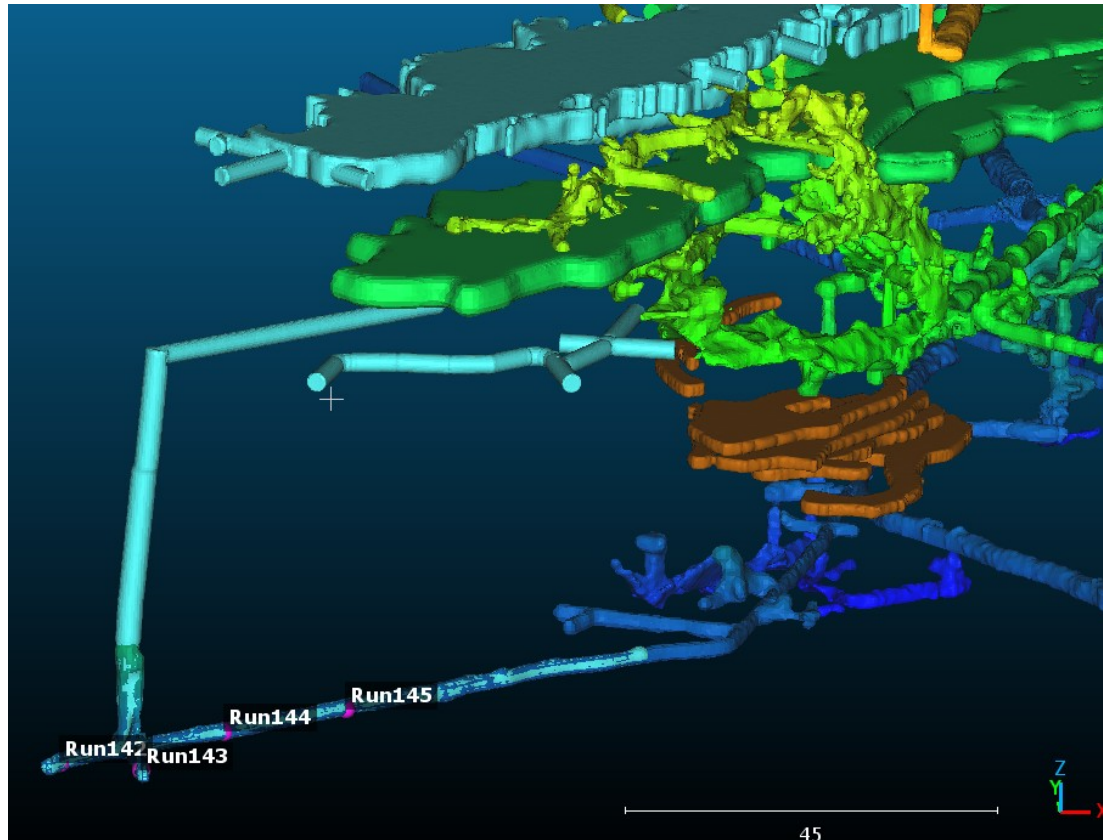
# Müogram készítése - anomáliák keresése

- Ismert közethiányok meghatározása: lézerszkennelés + térkép alapján modellezés



# Müogram készítése - anomáliák keresése

- Anomáliák megkaphatók a közethiány és az ismert üregek járulékanak különbségéből



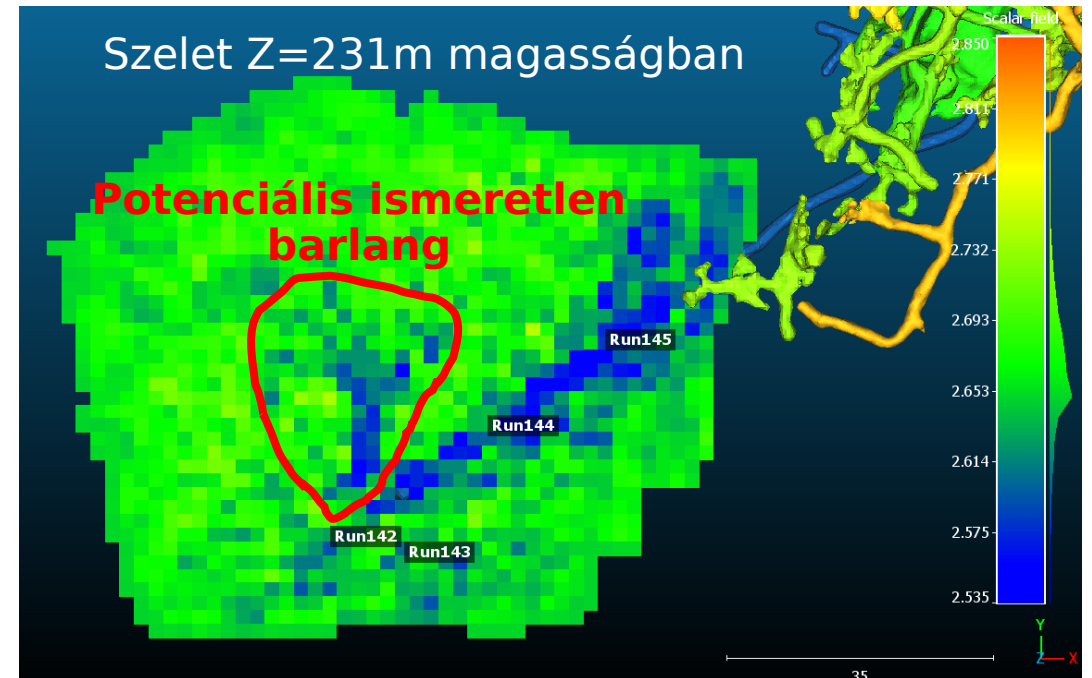
# Geofizikai inverzió

- Inverzió lényege: mértünk valamit, de mit? → keressük a hatót, amely a mért hatást kelti
- A teret felosztjuk kis térfogatelemekre (voxelek) → az ő sűrűségeik a hatók
- Alulhatározott probléma: nagyon kevés mérési pontból sok térbeli voxel sűrűségértékét kell visszaállítani (bonyolult matematikai probléma)

Ismert üregek



Invertált sűrűségek



# Témalehetőségek – [www.regard.wigner.hu](http://www.regard.wigner.hu), <https://wigner.hu/s/high-energy-geophysics/index.html>

---

- **Detektorfejlesztés, elektronika:** Hamar Gergő, Varga Dezső  
hamar.gergo@wigner.hu, varga.dezso@wigner.hu
- **Modellezés, szimuláció:** Oláh László, Varga Dezső  
olah.laszlo@wigner.hu, varga.dezso@wigner.hu
- **Numerikus fejlesztések:** Balázs László, Hamar Gergő  
balazs.laszlo@wigner.hu, hamar.gergo@wigner.hu
- **Felszín alatti müográfia, geofizikai kiértékelés:** Rábóczki Bence, Surányi Gergely,  
Hamar Gergő  
raboczki.bence@wigner.hu, suranyi.gergely@wigner.hu, hamar.gergo@wigner.hu
- **Felszíni müográfia, vulkán kutatás:** Oláh László, Hamar Gergő  
olah.laszlo@wigner.hu, hamar.gergo@wigner.hu
- **Alternatív müográfiai módszerfejlesztés:** Varga Dezső, Hamar Gergő, Oláh László  
varga.dezso@wigner.hu, hamar.gergo@wigner.hu, olah.laszlo@wigner.hu



ELTE

FACULTY OF  
SCIENCE

HUN  
REN



# Köszönöm a figyelmet!

*A kutatásokat támogatták:*

- *HUN-REN Hazahívó és Külföldi Kutatókat Toborzó Program (KSZF-144/2023)*
- *Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal, Tématerületi Kiválósági Program (Müográfiai műszerfejlesztés, TKP2021-NKTA-10)*
- *Vesztergombi Nagyenergiás Fizikai Laboratórium (VLAB)*

# Principles of muography – Creating a muogram

**Flux:** calculated from the number of recorded muons, detector area, zenith angle, detector efficiency and time **OR** taken from a *flux model* [4]

$$\phi = \frac{N}{A \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot t} \quad [\phi] = \frac{1}{m^2 \cdot sr \cdot s}$$

**Density length:** The product of the average density and length of the rock. Calculated from the measured flux and the *geoinformatic model* of the explored area **OR** an assumed average density & the GI model through rock length

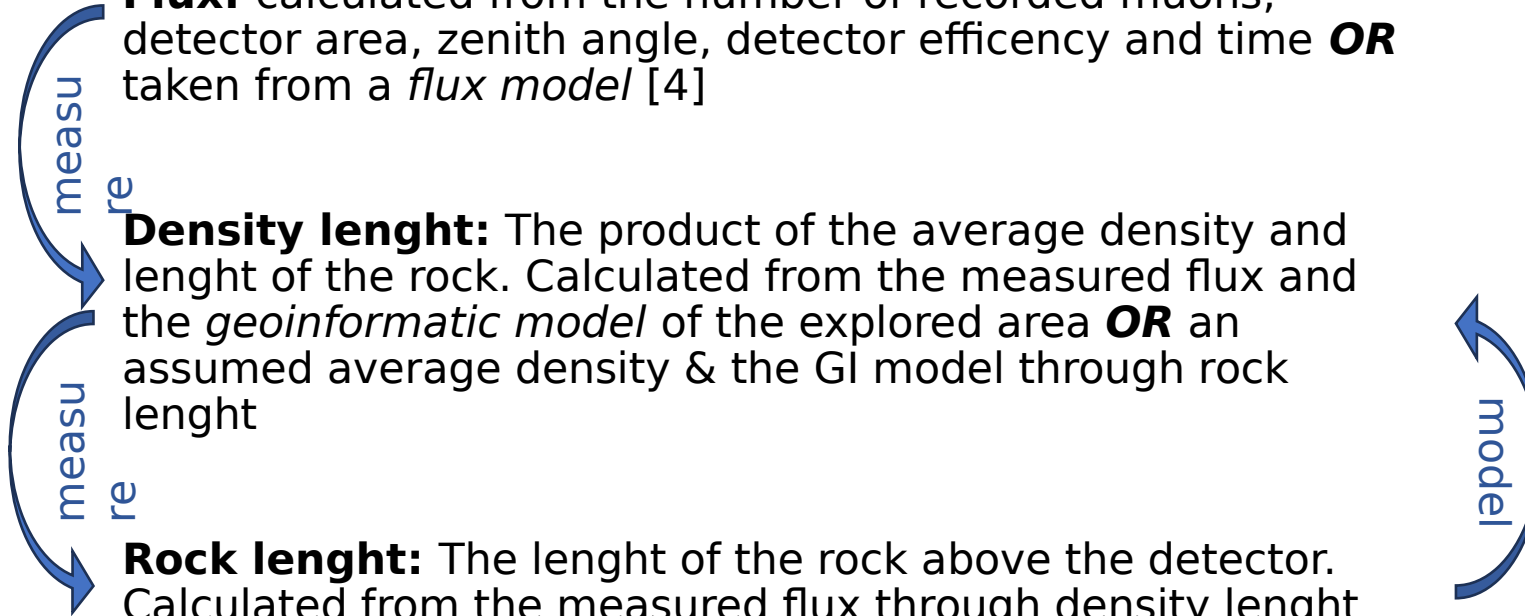
$$DL = \rho_{avg} \cdot RL \quad [DL] = \frac{kg}{m^2}$$

**Rock length:** The length of the rock above the detector. Calculated from the measured flux through density length and an assumed average density **OR** taken from the geoinformatic model

$$RL = \frac{DL}{\rho_{avg}} \quad [RL] = m$$

**Missing rock:** The difference between the modeled and the measured rock lengths → anomalies

$$MR = RL_{modeled} - RL_{measured} \quad [MR] = m$$



Measured Flux

Measured DL

Measured RL

Missing Rock [m]

Modeled DL

Modeled RL

$$\rho = 2.65 \frac{g}{cm^3}$$

