

Magyar Magfizikus Találkozó 2024

Nukleáris biztonság és védelem kozmikus müonok mérésével

Oláh László^{1,2}, Varga Dezső^{1,2}, Hamar Gergő^{1,2}

1 HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont

2 Nemzetközi Virtuális Müográfia Intézet

2024. szeptember 4.

HUN-REN
Magyar Kutatási Hálózat



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

AZ NKFI ALAPBÓL
MEGVALÓSULÓ
PROJEKT



Vázlat

I. Bevezetés

II. Nukleáris biztonság műion leképezéssel

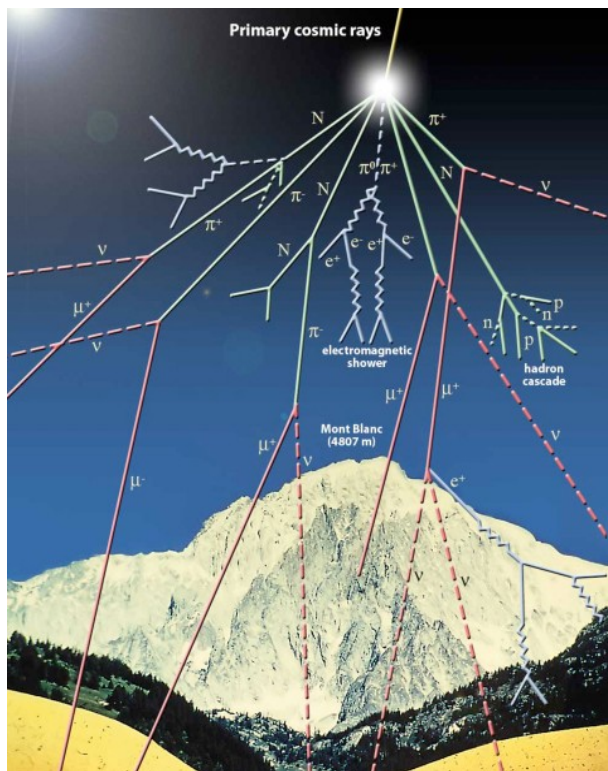
III. A műion tomográfia védelmi alkalmazásai

IV. Új fejlesztések a HUN-REN Wigner FK-ban

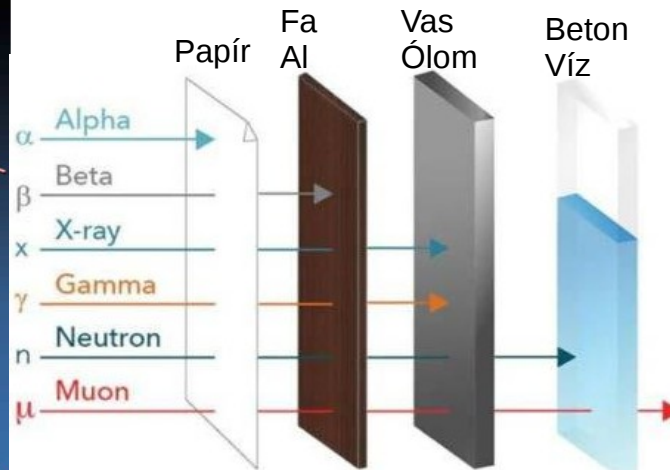
V. Összefoglalás és kitekintés

I. Bevezetés: Müonok és müográfia

- **Kozmikus müonok** légkörben keletkeznek és mindenhol eljutnak a Föld felszínére
- Nagy áthatoló képességgel rendelkező részecskék
- **Müográfia:** Röntgenezés müon forrással → roncsolásmentes, passzív technika

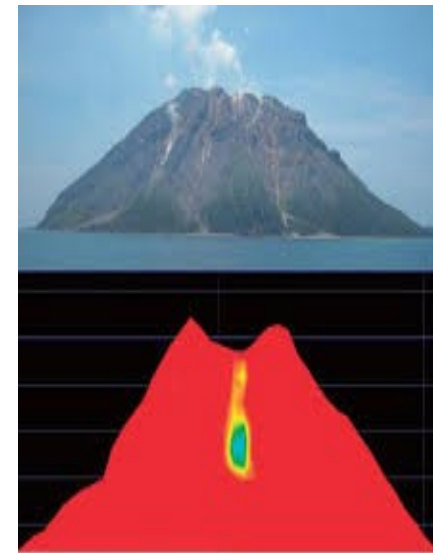


Forrás: CERN



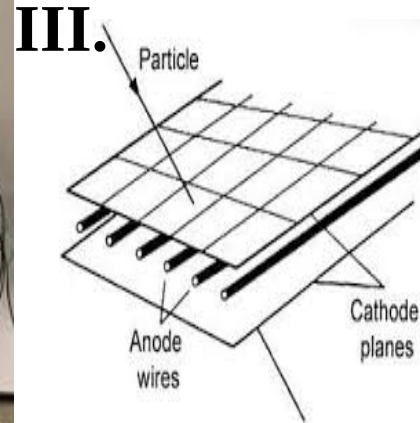
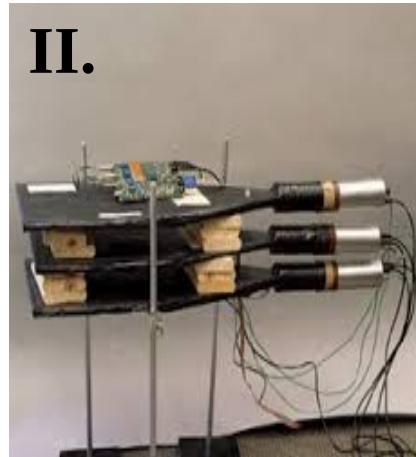
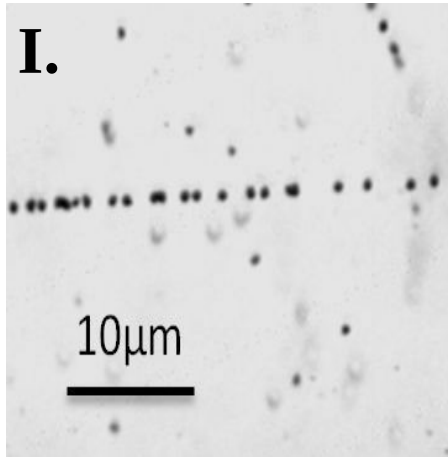
Forrás: Decision Sciences

Első Röntgen kép (1895)



Vulkánok első müográfiai képe Tanaka et al (2000-es évek)

Müon detektor technológiák



I. Emulziós detektor:
jó felbontás,
de nincs idő információ

II. Szcintillátor:
megbízható,
de költséges a felbontás

III. Gáztöltésű detektor:
jó felbontás,
de érzékeny a
környezeti
paraméterekre



Nagoya University

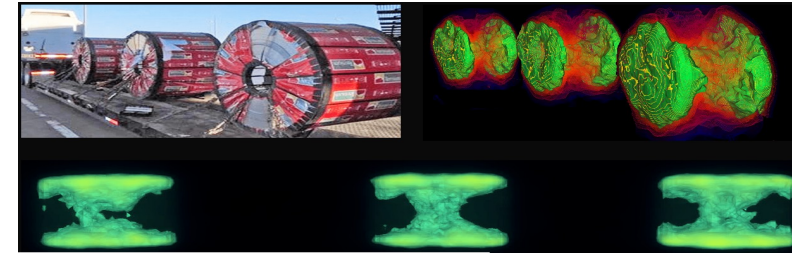
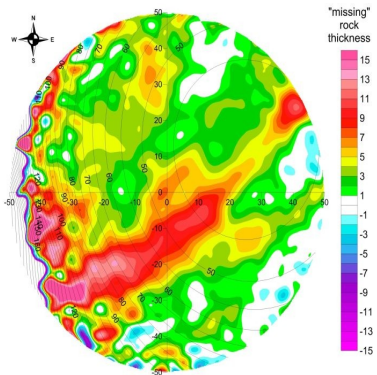


KEK



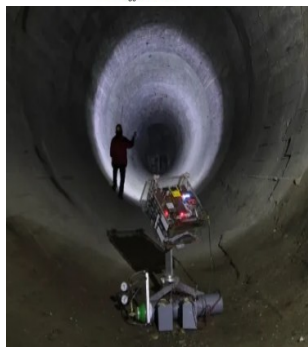
HUN-REN Wigner RCP
The University of Tokyo

Müon képképzési technikák

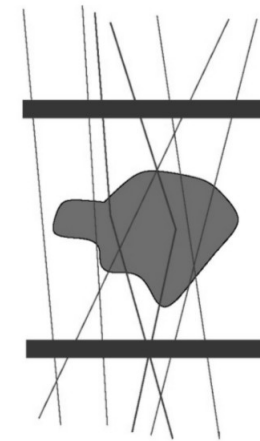
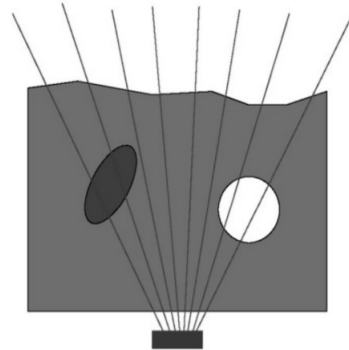


Elnyelődés (hozam változása) **Szóródás** (irány változása)

Decision Sciences

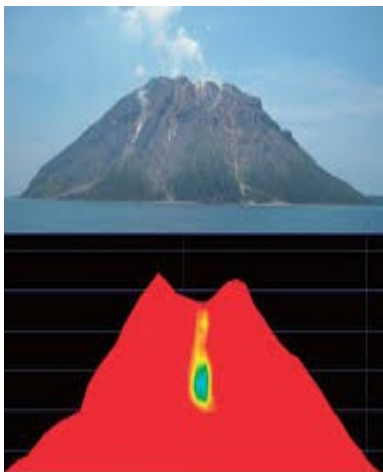


Földalatti
(magas vagy alacson sűrűség)

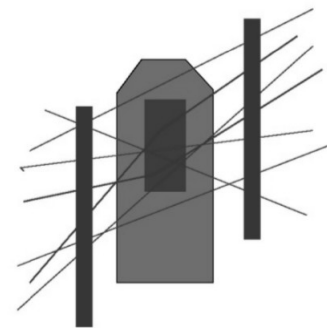
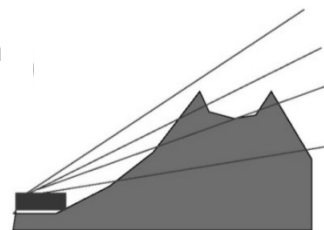


Objektum a detektor belsejében

HUN-REN Wigner RCP



Felszíni
(közel vízszintesen érkező müonok)

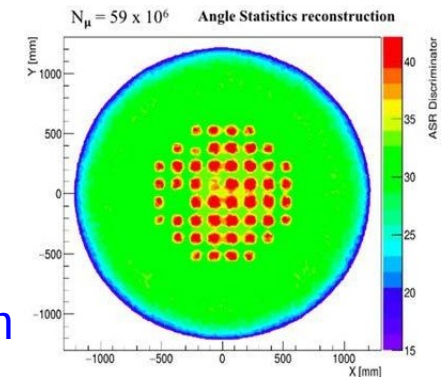


Objektum detektorral körülvéve

Credit: Varga D.

Oláh MMT 2024

CHANCE Consortium



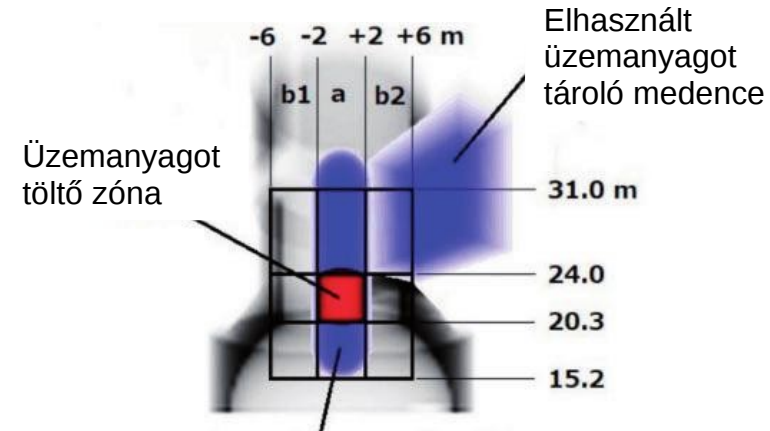
The University of Tokyo

II. Nukleáris biztonság műion leképezéssel

Fukushima Daiichi 1-es reaktor vizsgálata

Fujii et al. Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 043C02

- Szcintillátorok egy 10 cm vastag vas dobozban működtek 90 napig 36 m-re az 1-es reaktortól
- Nukleáris üzemanyag tömegét 72 tonnának mérték 160 tonna helyett → **Leolvadt az 1-es reaktor**



Reaktor nyomástartó edény

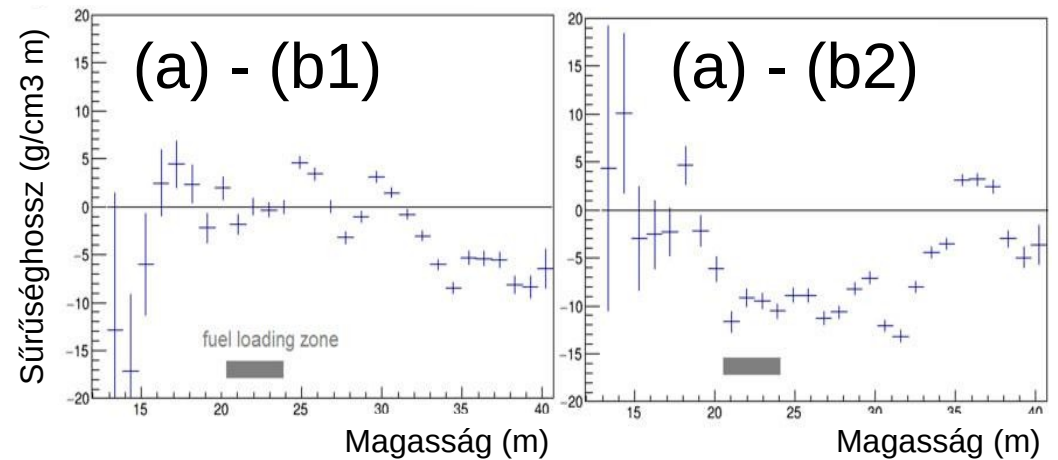
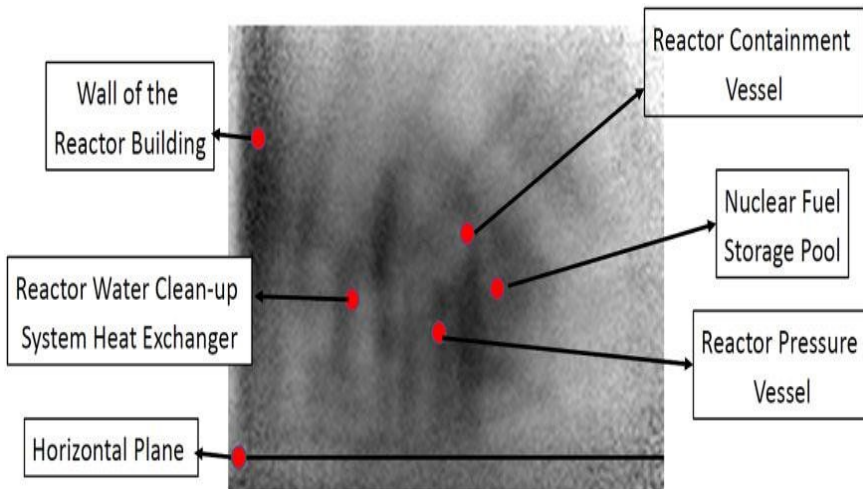


Table 1. Measured amount of material in the RPV for different height regions.

Region	15.2 m < h < 20.3 m (beneath loading zone)	20.3 m < h < 24.0 m (loading zone)	24.0 m < h < 31m (above loading zone)
(a) - (b1)	4±25(stat)±32(syst) tons	1±7(stat)±5(syst) tons	32±6(stat)±11(syst) tons
(a)	33±25(stat)±43(syst) tons	22±7(stat)±22(syst) tons	72*

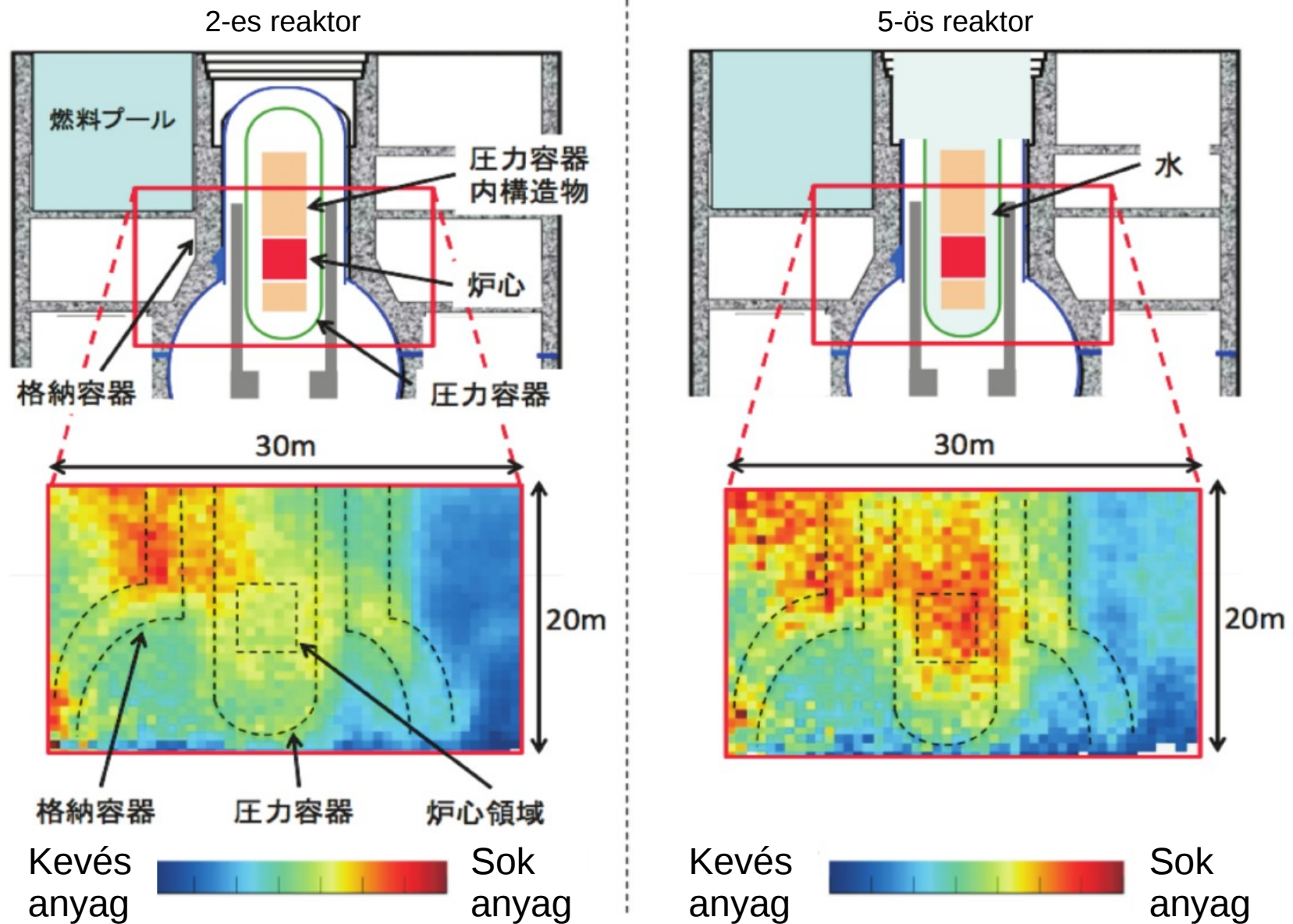
*Calculated from the engineering drawing.



Fukushima Daiichi 2-es és 5-ös reaktorainak vizsgálata

K. Morishima: Journal of the Photographic Society of Japan, 2016, Vol. 79, No. 1: 42-47

- Müografikus kép azt mutatja, hogy a 2-es reaktor leolvadt



Egy reaktor tomográfiája müonokkal

Procureur et al., Sci. Adv. 9, eabq8431 (2023)

CEA G2 reaktorának tomográfiája
27 pozícióból, 25-cmes voxelekkel

A Reaktor beton alapja, állványok a grafit kocka alatt

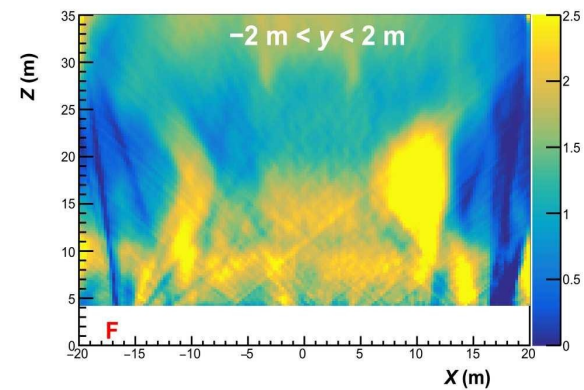
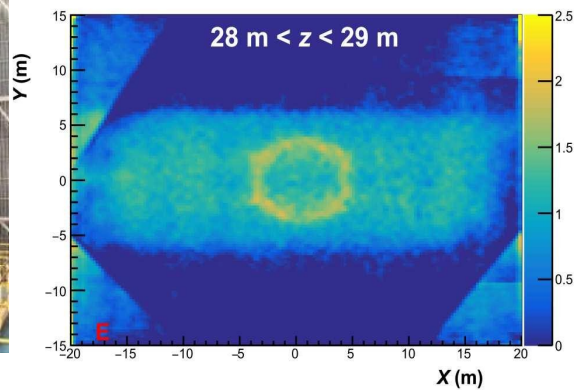
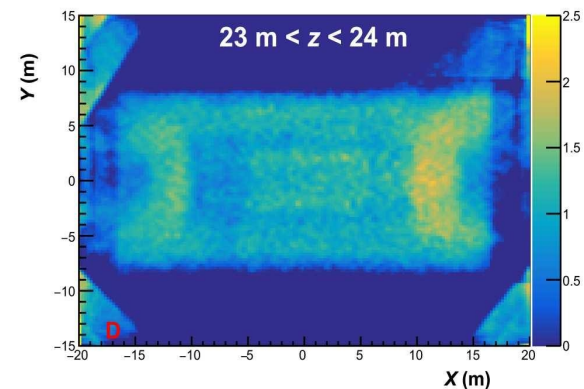
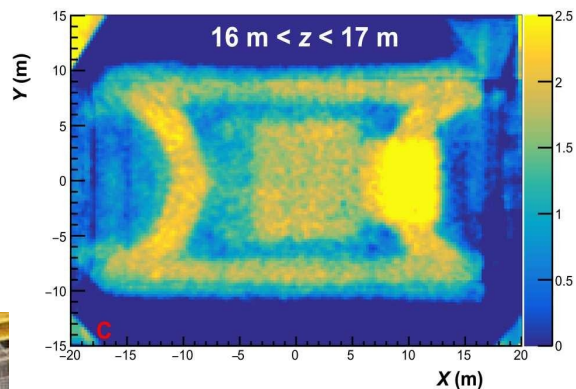
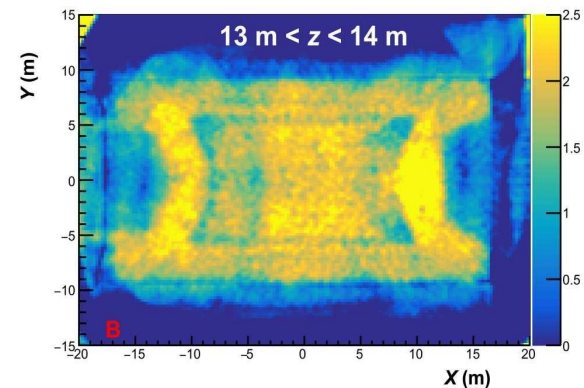
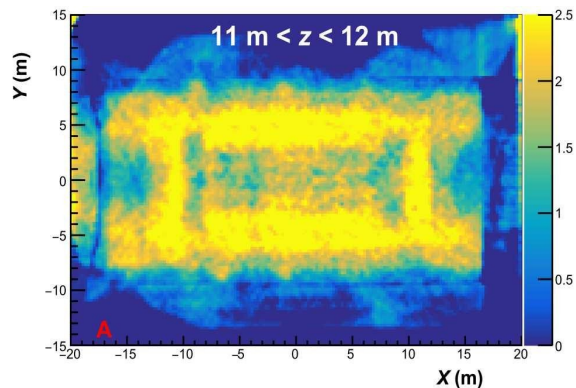
B Grafit kocka alsó része.

C A henger közepét megszű sík.

D A grafit szerkezet keskenyebb tetjénél

E Beton sapka a reaktor tetjén.

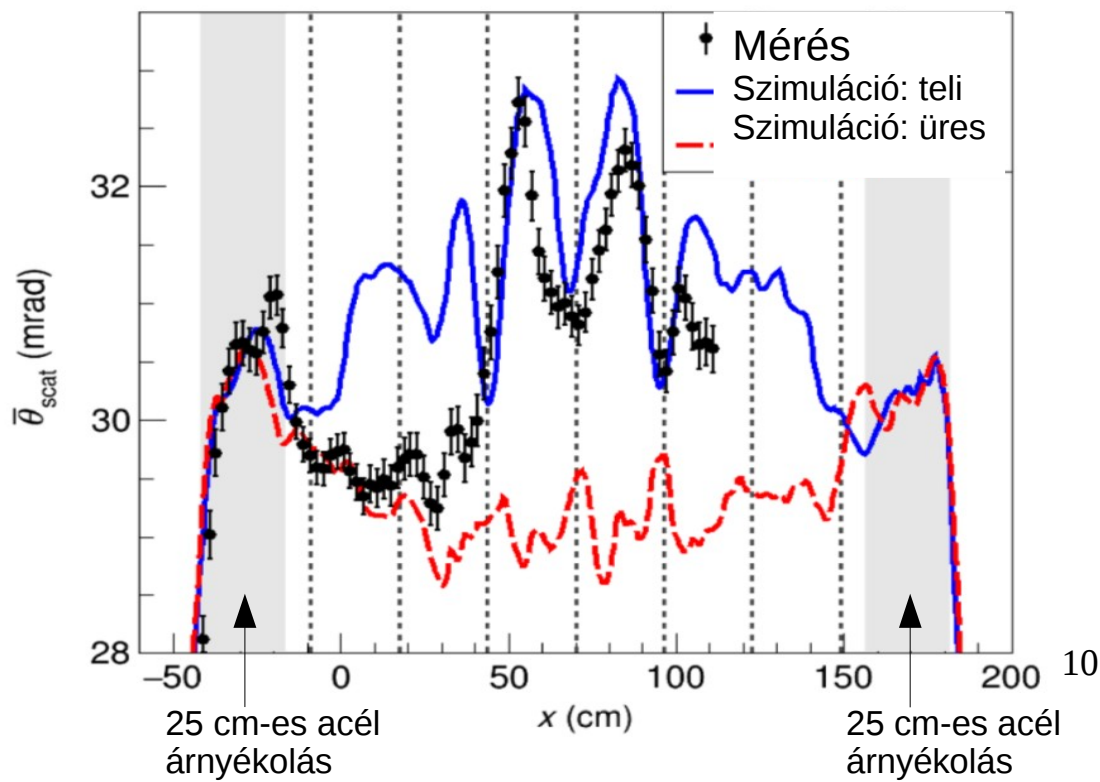
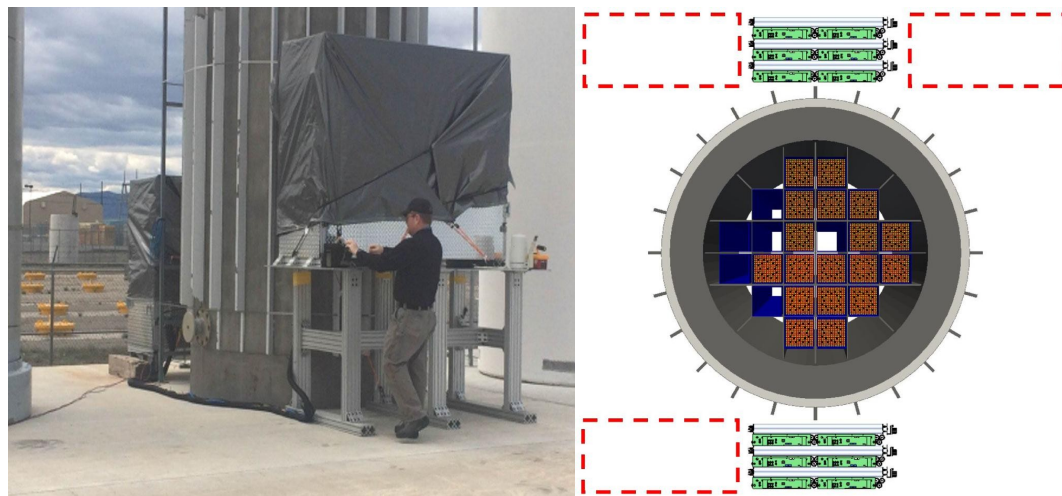
F x-z irány metszet az y irány közepénél



Nukleáris üzemanyag száraz tárolók vizsgálata

J. M. Durham et al. PHYS. REV. APPLIED 9, 044013 (2018)

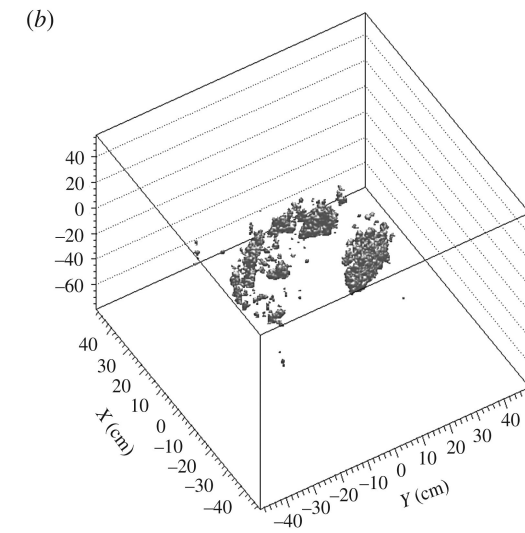
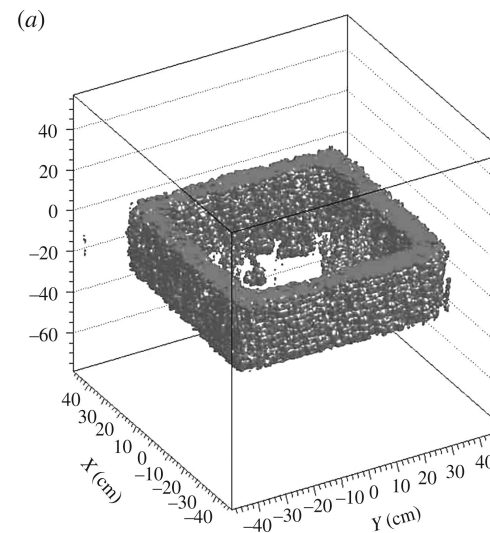
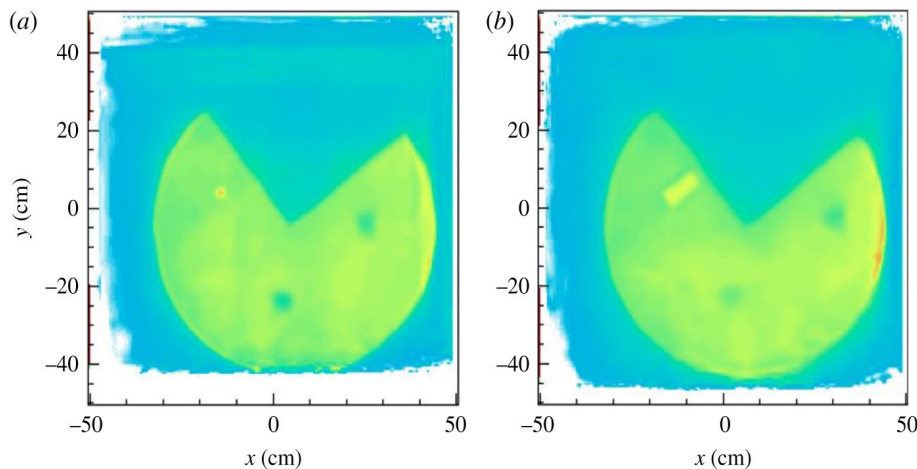
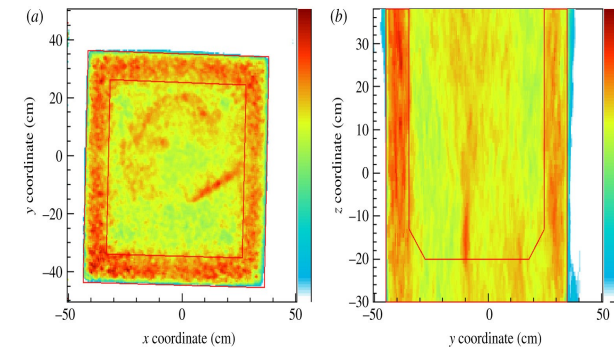
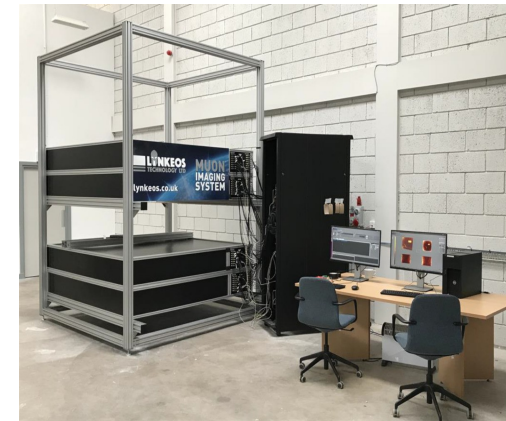
- A 3 m átmérőjű és 5 m magas hordó amely közepén egy kosár 20-30 elhasznált fűtőelemet tart és ezt vastag neutron és gamma árnyékolás veszi körül.
- 10-10 napos adatfelvétel
3 irányból: 40-90k müon/mérés
- Önálló módszer a hiányzó üzemanyag kazetták detektálására
- Más kazetták nem okoznak háttérrel a müográfiának
- Nincs szükség az üzemanyag előéletének ismeretére



Nukleáris szemét vizsgálata

- A nukleáris hulladékot tároló tartályok jellemzően erősen árnyékoltak és úgy vannak kialakítva, hogy radioizotópokat tároljanak és csillapítsák a sugárzást.
- A roncsolásmentes teszteléssel történő minőségbiztosítás feltárhatja a hulladék újracsomagolásának szükségességét.
- A Lynkeos anyagi megkülönböztetést hajtott végre 500 l-es hulladéktároló hordókban és geolvadékokban.

D. Mahon et al. PRSTA, 377, 20180048



III. A müion tomográfia védelmi alkalmazásai

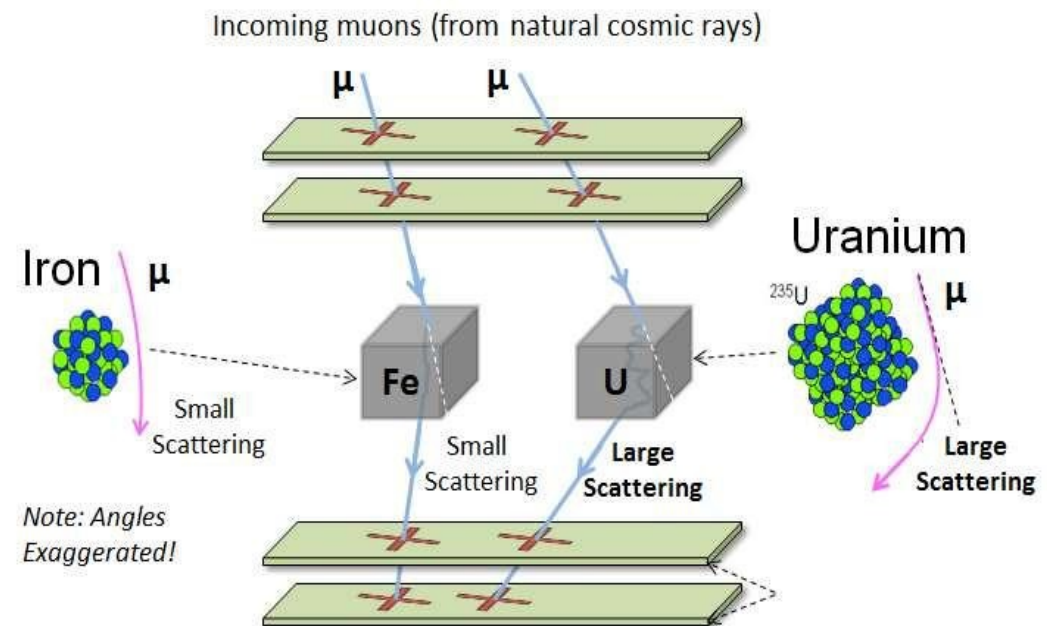
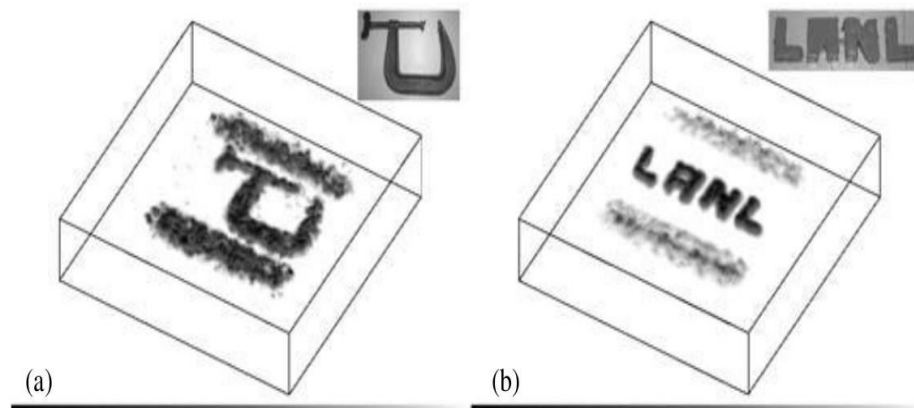
Magas rendszámú anyagok detektálása müon szóródásos tomográfiával

- Müonok többszörös szórása érzékeny az anyag rendszámára és sűrűségére
→ anyagok azonosítása
- **Technikai kérdések:**
 - Mennyi idő szükséges a méréshez?
 - Mekkora a szükséges helyfelbontás?
 - Miket mérünk, müonokat és/vagy elektronokat?
- **Néhány konténer szkener működik vi**

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

L. Schultz et al.: NIM A 519, 687 (2004)

Pesente et al.: NIM A 604, 738 (2009)



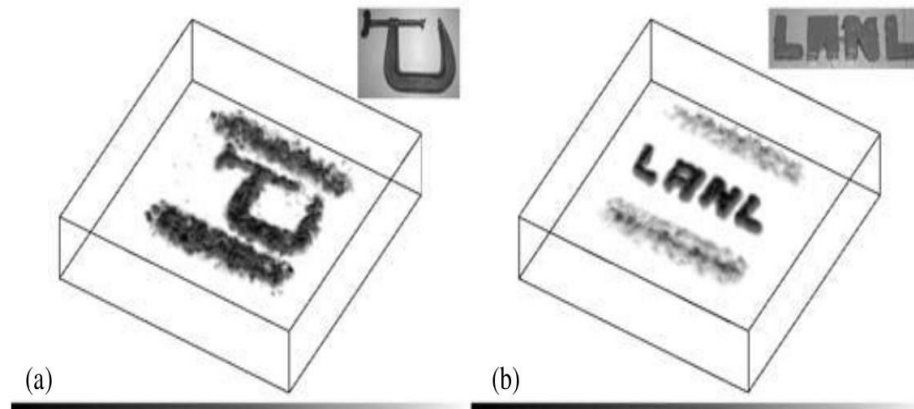
Magas rendszámú anyagok detektálása müon szóródásos tomográfiával

- Müonok többszörös szórása érzékeny az anyag rendszámára és sűrűségére
→ anyagok azonosítása
- **Technikai kérdések:**
 - Mennyi idő szükséges a méréshez?
 - Mekkora a szükséges helyfelbontás?
 - Miket mérjünk, müonokat és/vagy elektronokat?
- **Néhány konténer szkener működik világszerte.**

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

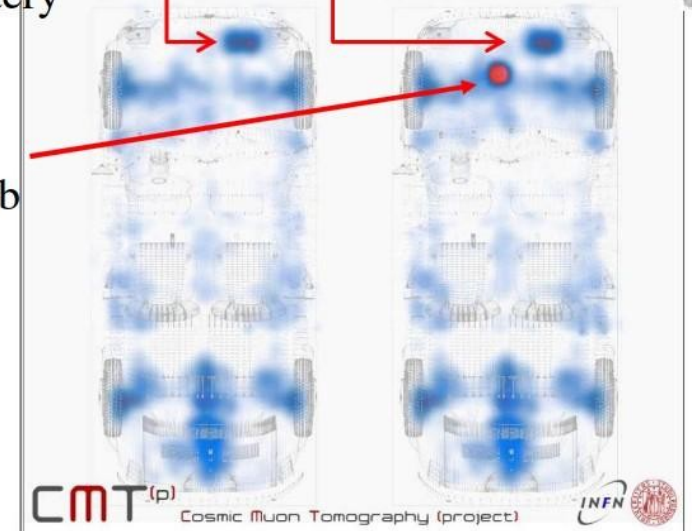
L. Schultz et al.: NIM A 519, 687 (2004)

Pesente et al.: NIM A 604, 738 (2009)



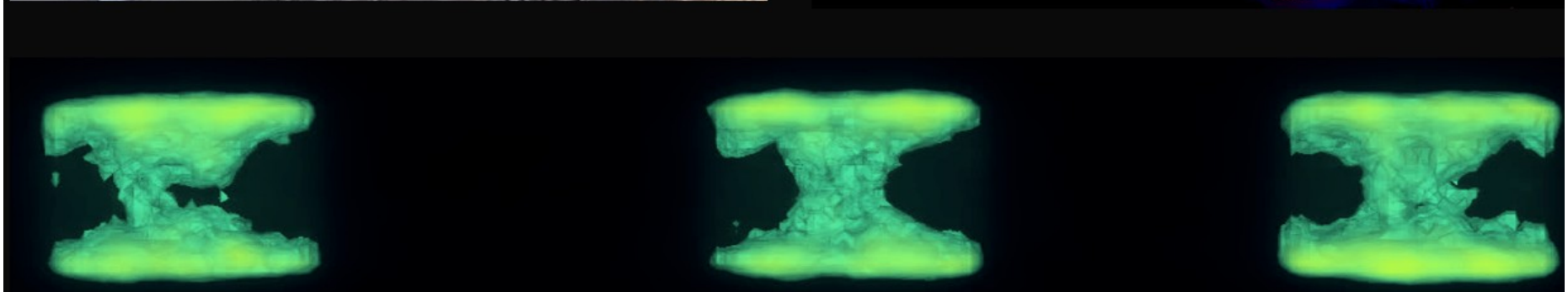
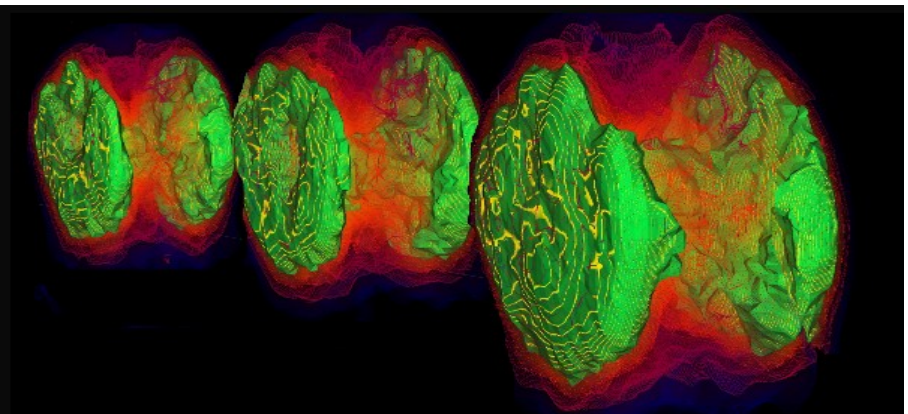
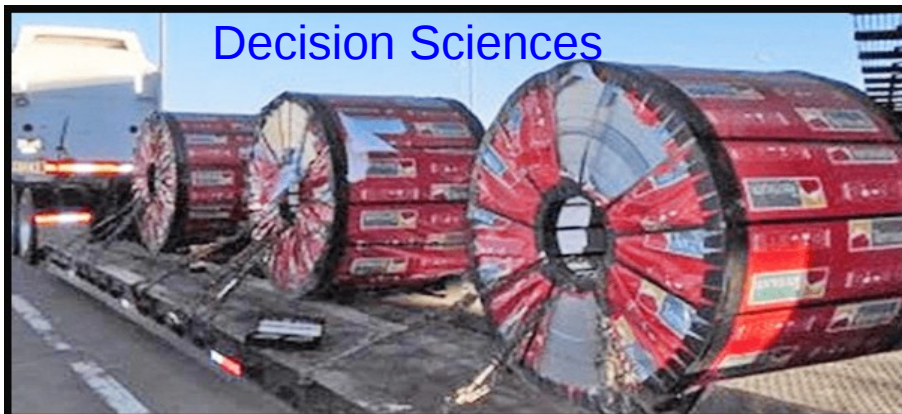
Battery

11 Pb



A csempészett anyagok felderítése a Decision Sciences által

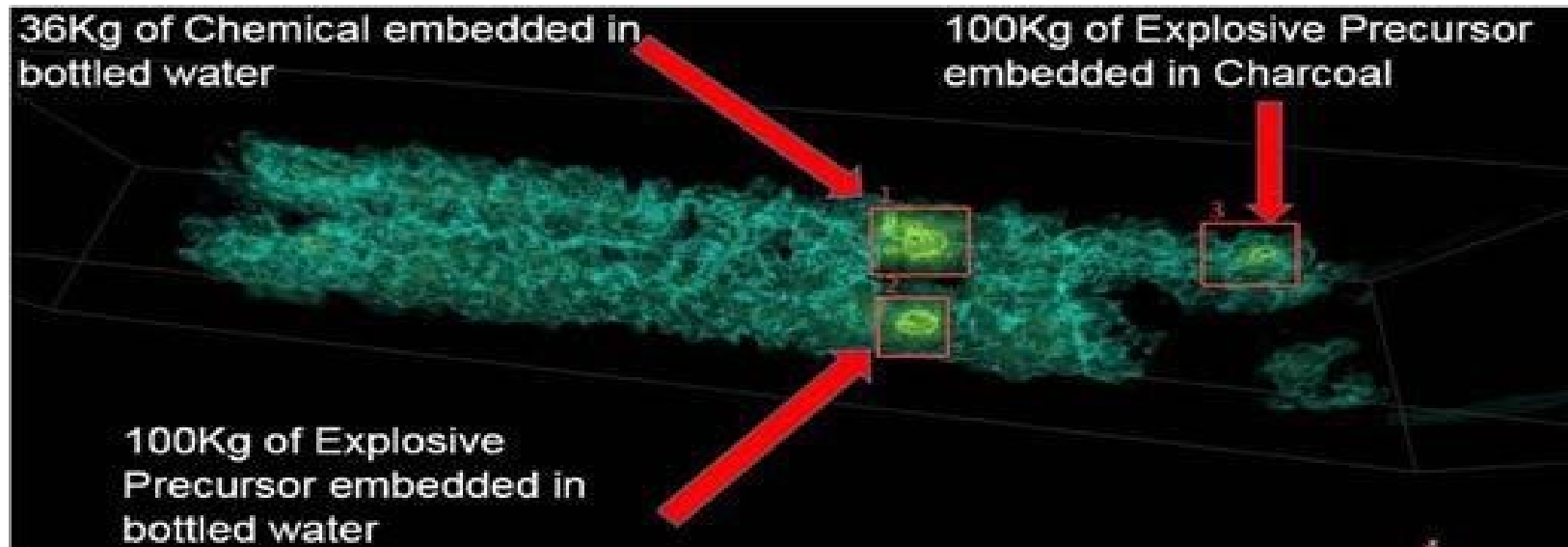
- A műonok áthatolnak a csempészetben használt árnyékoló anyagokon.
- 1900 kg csempészett marihuánát (20 millió dollár) találtak 24 hüvelyk acél mögött 4,5 perces műonos vizsgálattal.
- 10 perces vizsgálattal robbanóanyag-prekurzorokat mutattak ki egy palackozott vizek és szén-tároló tartályban.



A csempészett anyagok felderítése a Decision Sciences által

- A műonok áthatolnak a csempészetben használt árnyékoló anyagokon.
- 1900 kg csempészett marihuánát (20 millió dollár) találtak 24 hüvelyk acél mögött 4,5 perces műonos vizsgálattal.
- 10 perces vizsgálattal robbanóanyag-prekurzorokat mutattak ki egy palackozott vizek és szén-tároló tartályban.

Decision Sciences



IV. Új fejlesztések a HUN-REN Wigner Fk-ban

Infrastruktúrák és berendezések a nagyenergiás fizikai kutatások és alkalmazásaikért

Vesztergombi Nagyenergiás Fizikai Laboratórium (VLAB)

tiszta terek, konstrukciós laborok, földalatti laboratórium, stb.

→ Alkalmazás orientált kutatás fejlesztése a gáztöltésű detektoroknak nagyenergiás fizikai kísérletekhez (ALICE, CMS, NA61, etc.) és alkalmazásokhoz

Nemzetközi Virtuális Müoográfiai Intézet (VMI)

→ Közös laboratóriumok és obszervatóriumok Japánban, Olaszországban, Ománban.

→ Közös keretrendszer adatok tárolására, kezelésére és szimulációkra



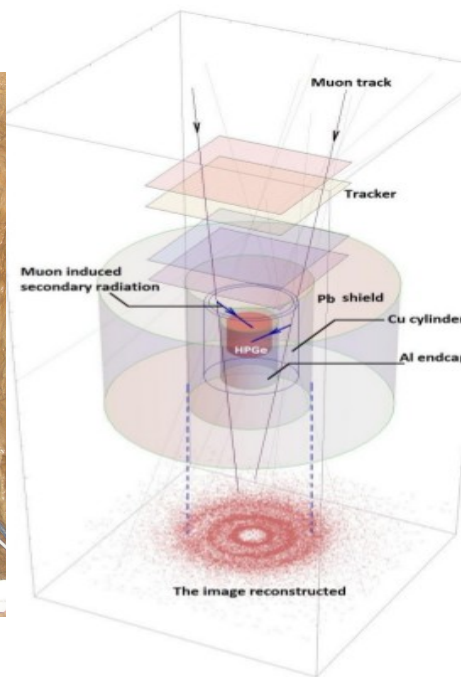
Müográfia Projekt Portfólió

- Muográfias kutatás fejlesztések kb. 15 éve a Wigner FK-ban
- **Innovatív Detektorfejlesztő Lendület Kutatócsoport** (<https://regard.wigner.hu/> 2013-)
- **Nagyenergiás Geofizika kutatócsoport** (<https://wigner.hu/s/high-energy-geophysics/> 2024-)
- Ágazatok közötti és nemzetközi együttműködések Európában és Ázsiában

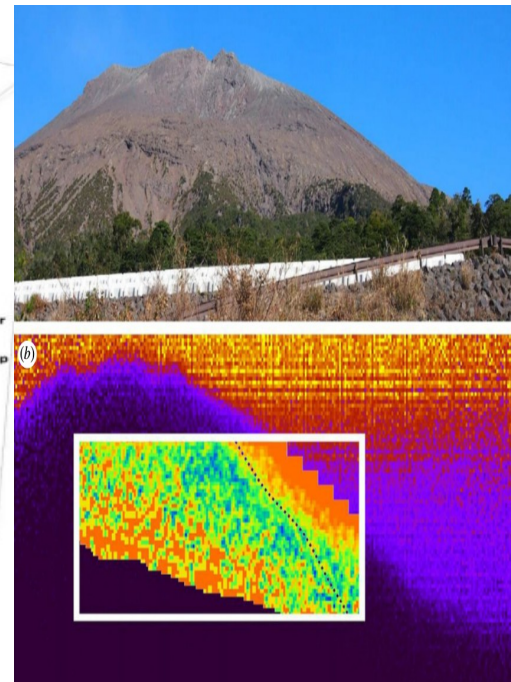
Alkalmazásorientált műszer fejlesztés



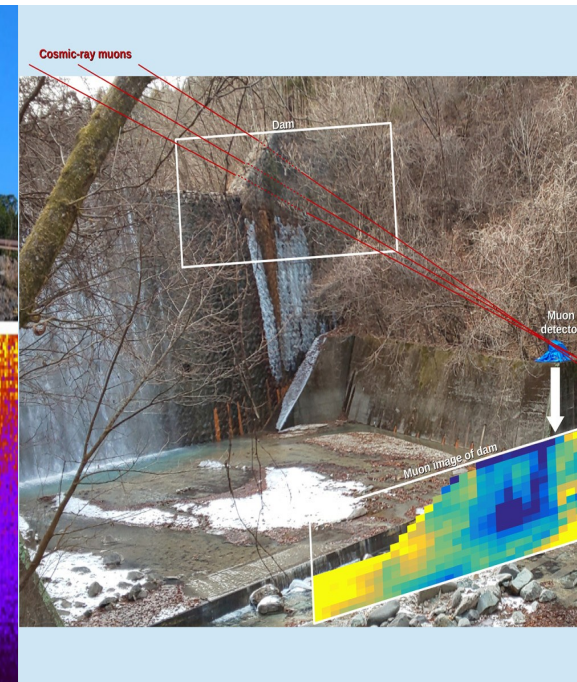
Új képalkotási Eljárások fejlesztése



Geofizikai alkalmazások: vulkanológia, geológia



Geotechnikai alkalmazások



Müon szóródásos tomográfia K+F

- Az első kis méretű prototípus és koncepció demonstrálása Pb, Fe és Al tömbökkel

L. Oláh et al. Journal of Physics: Conference Series 632 (2015) 012020

- Nagy méretű, robusztus és nagy teljesítményű sokszálas proporcionális kamrák

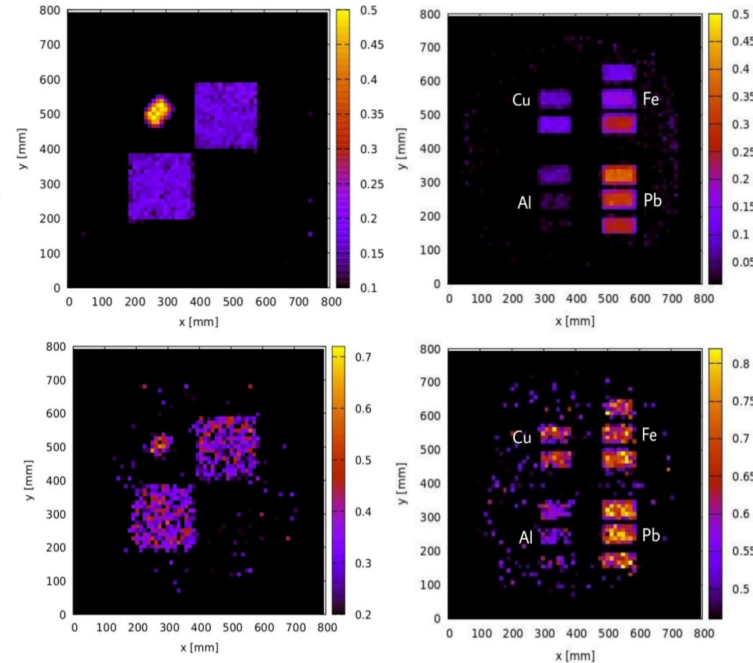
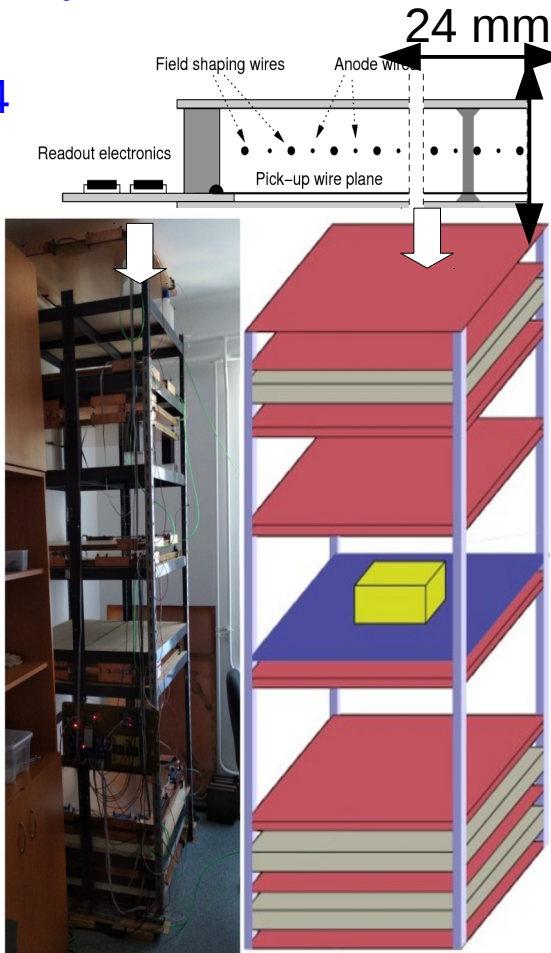
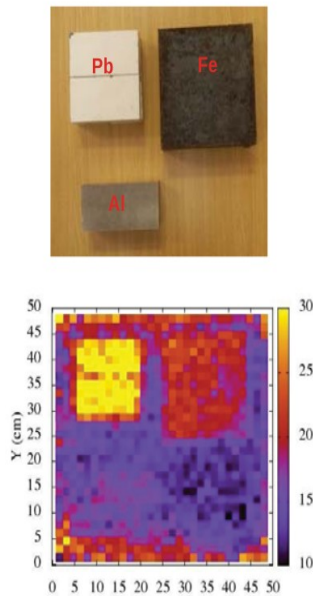
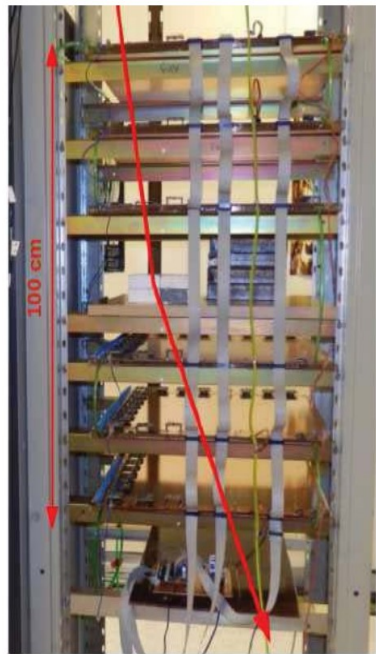
D. Varga et al. AHEP, 2016, 1962317

Muographic Observation Instrument WO2017187308

<https://patentscope2.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2017187308>

- Kísérleti lendület binelés

B. Csatlós et al. JAIS-496, 2024



Strukturális állapotfigyelés (SHM)

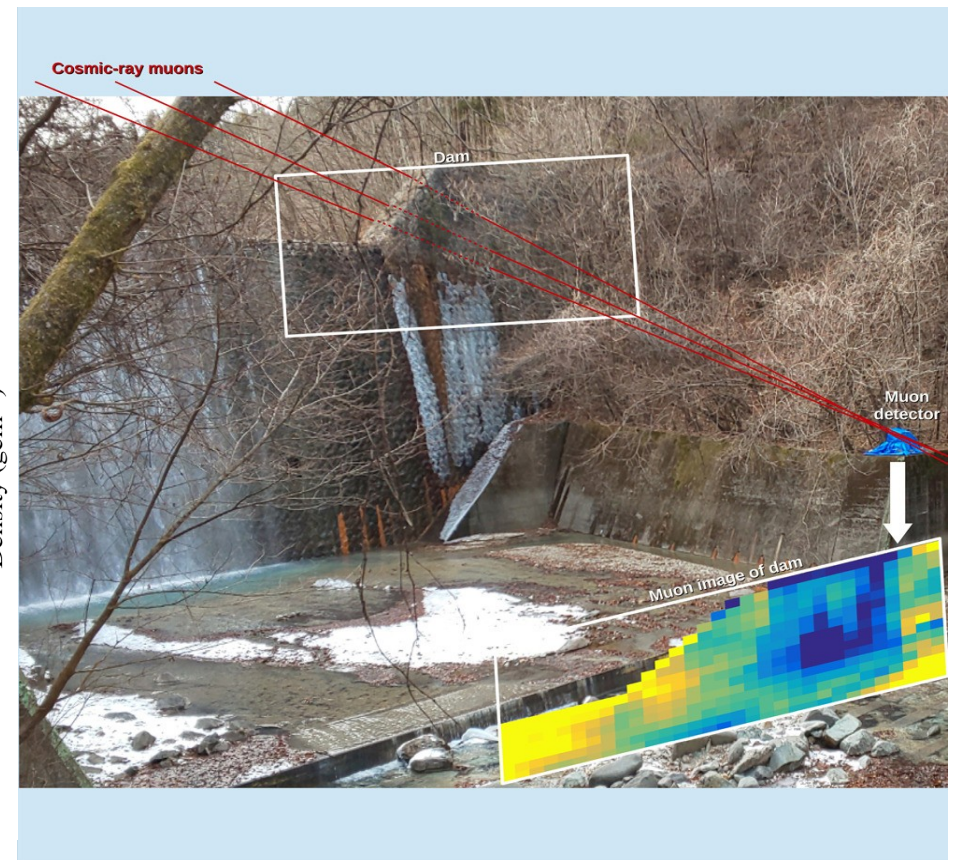
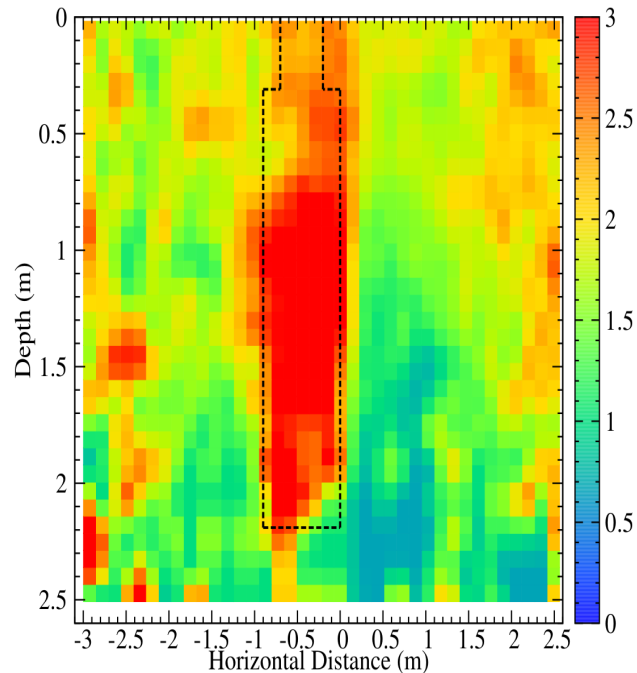
Eltemetett vasbeton vasúti pillér vizsgálata
(NEC, UTokyo & Wigner FK)

Kövekkel töltött sabo törmelékgyátak belső szerkezetének
leképezése (Sabo FF, Utokyo and Wigner FK)

L. Oláh et al.: Geophysical Exploration 71, 161-168

Undeground state observation device JP2020085732A
<https://patents.google.com/patent/JP7269595B2/en>

L. Oláh et al. (2023) iScience 26, 108019

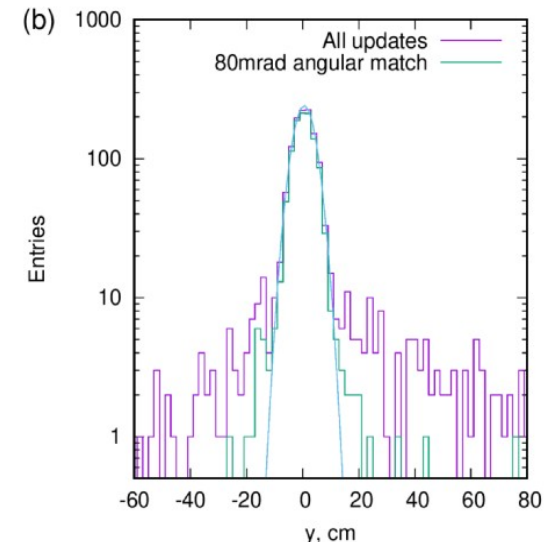
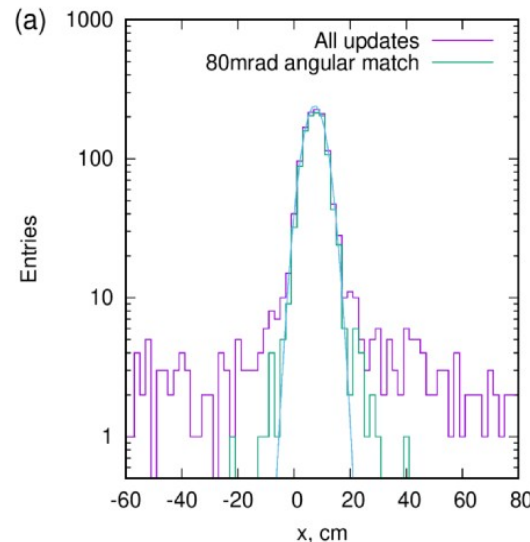
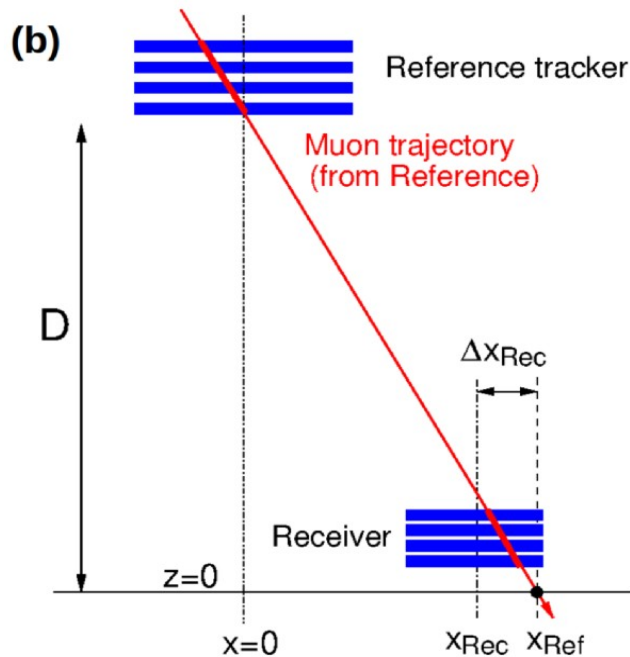
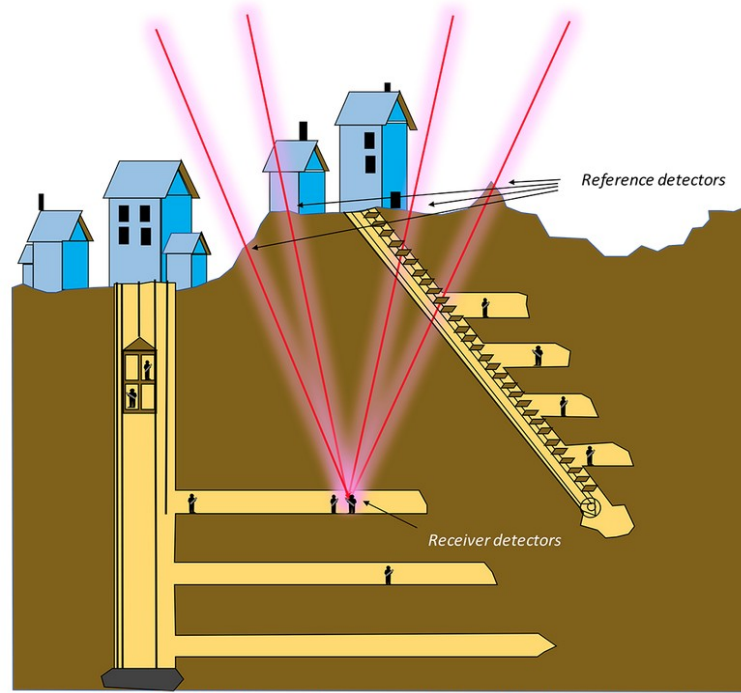


Navigáció müonokkal pozicionálással

Navigáció müonokkal föld alatti, víz alatti környezetben, például sérült atomreaktorok alatt.

A rádióhullámokkal, az akusztikus jelekkel vagy a lézersugarakkal ellentétben a muometrikus helymeghatározási pontosságot nem befolyásolják a környező környezetben lévő akadályok.

- Tanaka et al. First navigation with wireless muometric navigation system (MuWNS) in indoor and underground environments. *Iscience*, 26, 107000 <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107000>
- Tanaka, H.K.M. Muometric positioning system (muPS) utilizing direction vectors of cosmic-ray muons for wireless indoor navigation at a centimeter-level accuracy. *Sci Rep* 13, 15272 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41910-y>
- Varga, D., Tanaka, H.K.M. Developments of a centimeter-level precise muometric wireless navigation system (MuWNS-V) and its first demonstration using directional information from tracking detectors. *Sci Rep* 14, 7605 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57857-7>
- Submitted patent by Tanaka, Varga et al.



V. Összefoglalás és kitekintés

- Az elnyelődésen és/vagy szóródáson alapuló müon-leképezés lehetővé teszi a **nagyméretű szerkezetek roncsolásmentes, távoli és passzív vizsgálatát**.
- Az tudomány és ipar közötti együttműködésekben **a müon-leképezés hozzájárulhat a nukleáris biztonsághoz** (üzemanyag-hordók és nukleáris hulladék vizsgálata), **a katasztrófák mérsékléséhez** (reaktor képalkotás, robotok navigációja a sérült erőművekben) és **a védelemhez** (csempészett nukleáris anyagok felderítése).

Támogatók:

- **Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan (MEXT) Integrated Program for the Next Generation Volcano Research** <https://kazan-pj.bosai.go.jp/next-generation-volcano-pj-2019-jun>
- **Joint Usage Research Project (JURP) from the ERI, University of Tokyo** <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/en/joint-usage-top/>
- **"INTENSE" H2020 MSCA RISE, GA No. 822185 in Horizon 2020 from European Commission** <https://cordis.europa.eu/project/id/822185>
- **Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal TKP2021-NKTA-10 , OTKA FK-135349 pályázatai**
- **HUN-REN Hazahívó és Külföldi Kutatókat Toborzó Program KSZF-144/2023**

Kapcsolat:

Oláh László, Ph.D., Tudományos munkatárs, csoport vezető,
Nagyenergiás Geofizika Kutatócsoport,
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,
E-mail: olah.laszlo@wigner.hu
Weboldal: <https://wigner.hu/s/high-energy-geophysics/>

Köszönöm a figyelmet!