

# KÉPALKOTÁS KOZMIKUS RÉSZECSKÉK NYOMKÖVETÉSÉVEL

Oláh László, Balogh Szabolcs József, Hamar Gergő, Varga Dezső – MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont  
Gera Ádám László, Nyitrai Gábor, Pázmándi Zsolt Péter – Budapesti Műszaki- és Gazdaságtudományi Egyetem  
Surányi Gergely – MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport

## Motiváció

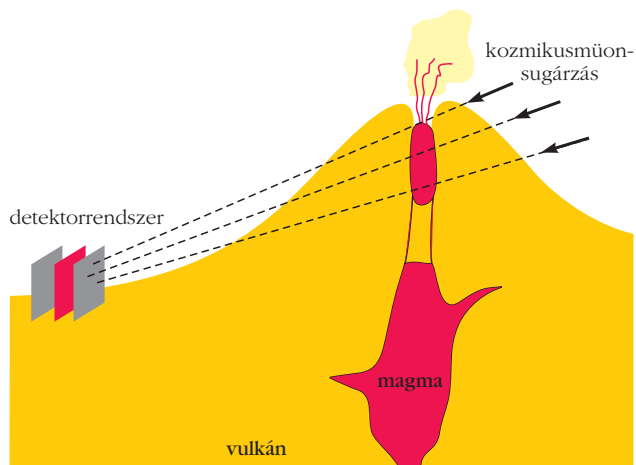
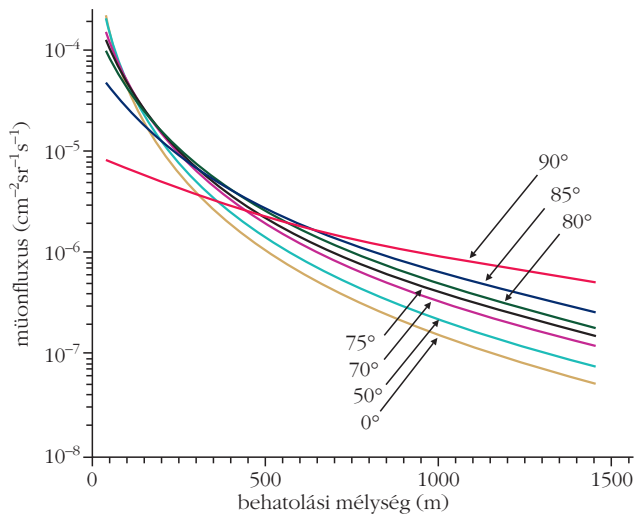
A kutatókat mindig motiválta, hogy képet alkossanak különböző dolgok belsejéről, kezdve az emberi testtől, a történelmi építményeken keresztül, akár a hegyekig. A részecskefizika forradalma új lehetőségeket nyitott a képalkotás terén is: az egyik első úttörő kísérletet *Wilhelm Conrad Röntgen* végezte el 1896-ban, aki az addig ismeretlen X-sugarakkal (röntgensugárzással) alkotott képet felesége kezéről egy fotografikus lemezre.

A részecskékkel történő képalkotásnak újabb lökést adott a müonok 1936-os felfedezése. A müonok természetes forrása az elsődleges kozmikus sugárzás (főleg protonok, alfa-részecskék) és a légkört alkotó  $O_2$ ,  $N_2$ -molekulák kölcsönhatásában keletkező pionok, kaonok bomlása. A kozmikus müonok viszonylag hosszú élettartamúak (2,2  $\mu s$ ), így fénysebességhez közeli sebességük okozta relativisztikus effektusok segítségével eljutnak Földünk felszínére is. Széles energiatarományon, körülbelül 100 TeV ( $10^{14}$  eV) energiáig detektálhatók. Az elektron nagy testvéreinek is nevezzük a müont, mert az elektronnal megegyező fizikai tulajdonságokkal (töltés, spin) rendelkezik, kivéve tömegét, amely körülbelül 200-szor nagyobb az elektronénál.

A müonok anyagban történő keresztülhaladásuk során elsősorban ionizációval veszítenek energiájukból: közelítőleg 2 MeV/cm a müonok energia-vesztése egységnyi sűrűségű anyagban történő keresztülhaladásuk során. A legnagyobb energiájú müonok akár több km vastagságú kőzeten is áthaladnak. Az 1. ábra mutatja a különböző zenitszögben érkező kozmikus müonok fluxusának csökke-

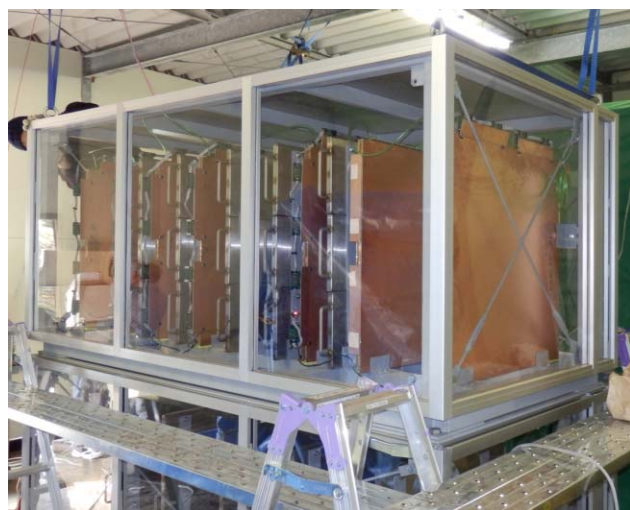
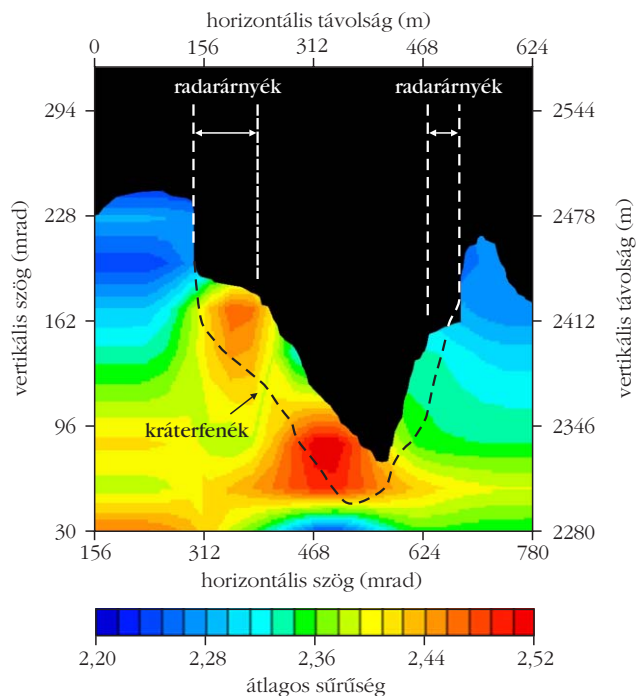
nését az áthatolt kőzet vastagságának növekedésével [1]. Az elnyelődés mértéke arányos az anyag vastagságával és sűrűségével, a sűrűség-hossz (vastagság  $\times$  sűrűség). A fluxust az anyagban történő elnyelődés mellett a müonok keletkezése is befolyásolja. Nagyobb zenitszögben vastagabb a légkör és nagyobb valószínűséggel bomlanak el a pionok és a kaonok, amely folyamatok több nagyenergiás müont eredményeznek. Emiatt a nagyobb zenitszögben érkező müonok fluxusa dominál a kőzetvastagság növekedésével.

1. ábra. Fölül a különböző zenitszögben érkező kozmikus müonok fluxusának csökkenése a  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$  sűrűségű kőzetbe történő behatolás mélységének növekedésével. Alul a mérési elrendezés egy vulkán belsejéről történő képalkotás esetén.



A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.

Az MTA Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoport (REGARD) a gázöltésű részecskedetektorok projektorientált kutatás-fejlesztésével foglalkozik. Hozzájárul az Európai Részecskefizikai Laboratórium (CERN) ALICE és NA61 kísérletei továbbfejlesztéséhez, valamint az RD51 együttműködés keretében aktívan részt vesz a gáz elektronsokszorozó-detektorok (GEM) kutatás-fejlesztésében. Továbbá neutrondetektorokat fejleszt a European Spallation Source (ESS) kísérleti együttműködésnek. Az alapkutatások és cikkekben bemutatott alkalmazott kutatások mellett a REGARD csoport lehetőséget biztosít középszintű diákoknak, fizikus- és mérnök-hallgatóknak laboratóriumi gyakorlatokra, a kísérleti részecskefizika alapjainak elsajátítására. A csoport kutatásait a Magyar Tudományos Akadémia Lendület Programjának LP2013-60 számú pályázata támogatja.



2. ábra. Fölül az Asama-vulkánról készített müográf a vulkán 2004-es kitörése után. Müon-radiográfiával detektálták a kráter alján lerakódott  $2,45\text{--}2,52\text{ gcm}^{-3}$  sűrűségű lávát  $400\text{--}600$  mrad horizontális és  $60\text{--}120$  mrad vertikális szögtartományon. A szaggatott vonal mutatja a radar képalkotásának mélységét [1]. Alul a sokszálas proporcionális kamrákból felépülő Müografikus Megfigyelő Rendszer első prototípusa [5, 6].

A müonok detektálásával képet alkothatunk nagy-méretű dolgok belsejéről is: a vizsgált objektumon keresztülhaladó kozmikus müonok fluxusát mérve – az objektum a sűrűségének ismeretében – kiszámolhatjuk annak vastagságát, vagy vastagságának ismeretében sűrűségét. Ezt az eljárását müon-radiográfiának, röviden müográfának nevezzük. A 20. század közepétől kezdődően müon-radiográfiával is végeznek régészeti kutatásokat a gízai piramisokban, rejtett, föld alatti üregeket és nagysűrűségű érceket tárnak fel barlangokban, illetve bányákban elhelyezett müondektorokkal. Továbbá vulkáni kürtők sűrűségváltozását méri az 1. ábra alsó részén látható módon [1].

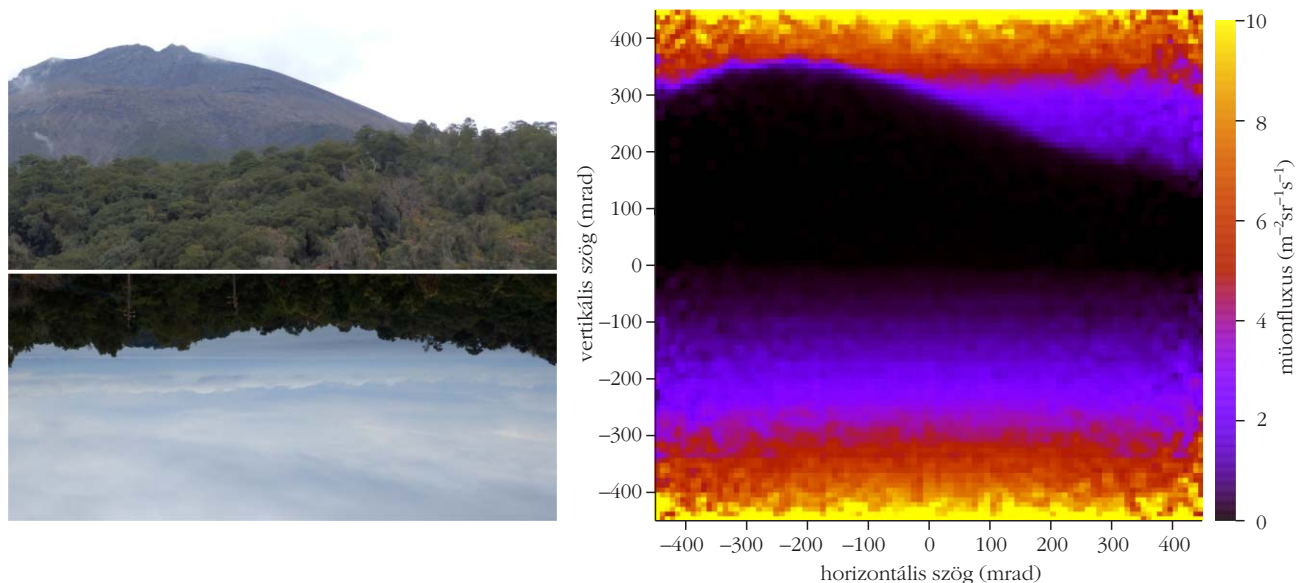
A müonok az anyagon történő áthaladásuk során – az elnyelődés mellett – irányt is változtatnak (többszörösen szóródnak), eltérülésük az anyag sűrűségével közelítőleg arányos. Ha a vizsgált objektumot detektorokkal vesszük körül, megmérjük a müonok irányát az anyagba történő belépése előtt, valamint a kilépése után, akkor információt kaphatunk a vizsgált anyag sűrűségeloszlásáról. Ezen eljárás lehetséges alkalmazásai például a nukleáris csempészárak detektálása, vagy az atomreaktorok szerkezetének vizsgálata.

A részecskedetektor-technológia fejlődése a 21. század elejére lehetővé tette a megbízható, hosszú távú, folyamatos emberi felügyeletet nem igénylő mérések végzését laboratóriumon kívül is. Az MTA Wigner FK Lendület Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoport motivációja müon-radiográfiára optimalizált gáztöltésű detektorrendszerek és képalkotó eljárások fejlesztése a fentebb említett környezeti és ipari alkalmazásokra. Csoportunk kifejlesztett egy hordozható részecskedetektort föld alatti üregek és sűrűséginhomogenitások kutatására, amely első sikeres alkalmazásait a [2] és [3] cikkekben ismertettük. Jelen írás a vulkánok belsejének és a kis sűrűségű anyagok képalkotására koncentrálnak.

## Vulkáni tevékenység vizsgálata kozmikus müonok detektálásával

A vulkánok belső szerkezetéről történő képalkotás, a kitérések előrejelzésének és monitorozásának társadalmi haszna megkérdőjelezhetetlen: hatalmas katasztrófákat és gazdasági károkat előzhet meg – gondoljunk csak az izlandi Eyjafjallajökull-vulkán 2010-es kitérésére és az európai légi közlekedés megbénulására.

A müon-radiográfia egy kiváló eljárás a vulkáni tevékenység képalkotására, jól kiegészíti a hagyományos geofizikai, például szeizmikus és elektromos módszereket. A müon-radiográfia nagyobb térfogatról képes képet alkotni jobb helyfelbontással (néhány 10 m). További előnye, hogy nagyobb távolságról, akár több km-ről is képet alkothatunk a vulkán belsejéről. A müon-radiográfiával előállított sűrűségterképekből a kitérés nagyságára és időtartamára következtethetnek a geológusok. A 2. ábra felső részén található az első „müográf” egy aktív vulkán belsejéről, amelyen jól látható a kráter alján lerakódott  $2,45\text{--}2,52\text{ gcm}^{-3}$  sűrűségű láva a  $400\text{--}600$  mrad horizontális és  $60\text{--}120$  mrad vertikális szögtartományokon [1]. Az Asama-vulkán 2004-es kitörése után *H. K. M. Tanaka* és munkatársai emulziós detektorokat helyeztek el 1 km távolságra a krátertől és  $10\text{ mrad} \times 10\text{ mrad}$  pontossággal megmérték a vulkánon keresztülhaladó kozmikus müonok fluxusát. A 3 hónapos mérés során  $3,2\%$  pontossággal határozták meg az Asama-vulkán sűrűségét  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  felbontás mellett. A következő út-törő mérést is *Tanaka* és munkatársai végezték el *Satsuma-Iwojima-vulkán* 2013-as júniusi és júliusi kitö-



3. *ábra.* Balra a detektorrendszer előtt elhelyezkedő Sakurajima-vulkán (felső) és a detektor mögötti tenger és égbolt (alsó) fényképe. Jobbra a Müografikus Megfigyelő Rendszer első képe a Sakurajima-vulkánról.

rései során [4]. Szcintillátorokból felépített,  $2 \text{ m}^2$  felületű, 10 cm-es szegmentálságú detektorrendszert helyeztek el a vulkánnál, és 3 napos időtartamú mérésekkel nyomon követték a láva mozgását a kráter belsejében.

Távlati cél a sűrűségterképek 12 órás időfelbontással történő elkészítése, a kitörések jellegének, időtartamának előrejelzése. A vulkánok átvilágításának mindennapos megvalósításához és széles körű alkalmazásához költséghatékony, kisebb fogyasztású ( $< 50 \text{ W}$ ), nagyobb felületű (több  $10 \text{ m}^2$ ), jobb helyfelbontású ( $< \text{cm}$ ) detektorrendszerek alkalmazása szükséges.

Erre a célra az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont és a Tokiói Egyetem együttműködésének keretében kifejlesztettünk egy gáztöltésű detektorrendszert, a *Müografikus Megfigyelő Rendszert* (Muographic Observation System) [5, 6]. A detektorrendszer gáztöltésű, két dimenzióban érzékeny sokszálas proporcionális kamrákból épül fel, amelyek nyomkövetési határfoka közel 100%, helyfelbontása 4 mm mindkét irányba és 10 mrad szögfelbontás is elérhető a kamrák megfelelő elhelyezésével. A kamrákban  $+1700 \text{ V}$  nagyfeszültséget alkalmazunk az anódszálakon az optimális nyomkövetési határfok eléréséhez. A mérések során argon és szén-dioxid gázok 80:20 arányú keverékét áramoltatjuk keresztül a detektoron. Ez egy nem gyúlékony, nem mérgező, olcsó keverék, amely kiválóan használható laboratóriumon kívül is.

A kamrák jeleit a föld alatti detektorainknál is alkalmazott elektronikák segítségével erősítjük, digitalizáljuk, majd továbbítjuk a mérést vezérlő RaspberryPi mikroszámítógépre. A részecskék kamrákban hagyott nyomainak koordinátái egy 16 GB-os SD-kártyára gyűlnek, amely körülbelül 8 hónap alatt telik meg a szabad ég alatt mért részecskeráta ( $\sim 10 \text{ Hz}$   $0,6 \text{ m}^2$ -es kamrákkal) mellett. A detektorrendszer folyamatosan elérhető kábeles vagy vezeték nélküli (Wifi, Hotspot) internet-

kapcsolat segítségével, ezáltal lehetőség van az adatok folyamatos elérésére és elemzésére, a müonfluxus és a sűrűségterképek folyamatos (online) elkészítésére. A detektorból érkező adatokat a nagyenergiás fizikában is alkalmazott adatelemzési módszerekkel dolgozzuk fel: megkeressük a kamrákon a részecskebeütések helyét, majd egy kombinatorikus algoritmussal megkeressük a részecske legvalószínűbb, a beütésekre legjobban illeszkedő pályáját. Ezután meghatározzuk a müonok irányát, majd fluxusát a detektor geometriájának és határfokának figyelembevételével.

A kamrák között ólomlemezeket kell elhelyeznünk a detektor jel/zaj viszonyának maximalizálása céljából, ugyanis a lemezekben elnyelődnek vagy irányt változtatnak a légkörből és a talajból a detektorba szóródó, azaz nem a vulkánon keresztül érkező kisenergiás ( $< 1 \text{ GeV}$ ) müonok és a kozmikus sugárzás elektromágneses komponensében érkező elektronok és pozitronok. Minél pontosabban mérjük a detektoron keresztülmenő részecskék pályáját, azaz minél jobb a detektor helyfelbontása, annál kevesebb lemez szükséges a részecskék irányváltoztatásának kiméréséhez. A 2013-ban Satsuma-Iwojima-vulkánál alkalmazott detektorrendszerben öt darab 10 cm vastagságú ólomlemez és tartóelemeket (összesen körülbelül  $14000 \text{ kg}$ ) kellett elhelyezni a szcintillátorlemez rosszabb (10 cm) helyfelbontása miatt. A 4 mm helyfelbontású, gáztöltésű detektorrendszer alkalmazásával az ólomlemez vastagsága körülbelül 10 cm-re csökkenthető. A 2. *ábra* alsó részén látható a detektorrendszer fényképe.

A Müografikus Megfigyelő Rendszer első prototípusának tesztelését Japánban a Kjúszu-szigetén található Sakurajima-vulkánál végezzük 2017. január 18. óta. A mérés célja a detektorrendszer hosszú távú működésének, stabilitásának vizsgálata, praktikus alkalmazhatóságának demonstrálása. A 3. *ábra* bal oldali felső fényképen látható a detektor előtt elhelyezkedő

vulkán, az alsó, fordított fénykép a detektor mögött található tengert és az égboltot mutatja, a jobb oldalon a néhány nap alatt rögzített adatokból  $6 \text{ mrad} \times 6 \text{ mrad}$  szögfelbontással számolt fluxus látható, amely a fényképekkel konzisztens képet ad és a vulkán alakját mutatja.

A fentebb bemutatott eredmények és új fejlesztések azt mutatják, hogy vulkánok működésének vizsgálata kozmikus müonok nyomkövetésével ígéretes kutatási terület. A részecskefizikusok és a földtudományok szakértőinek összefogása nagy társadalmi haszonnal rendelkező eljárás létrejöttéhez vezethet.

## Kis sűrűségű anyagok képalkotása

A kozmikus müonok elnyelődésén és szóródásán alapuló eljárások alkalmazhatók kis sűrűségű anyagok képalkotására, azonban relatíve sok idő (több nap) szükséges az anyagok detektálásához és megkülönböztetéséhez.

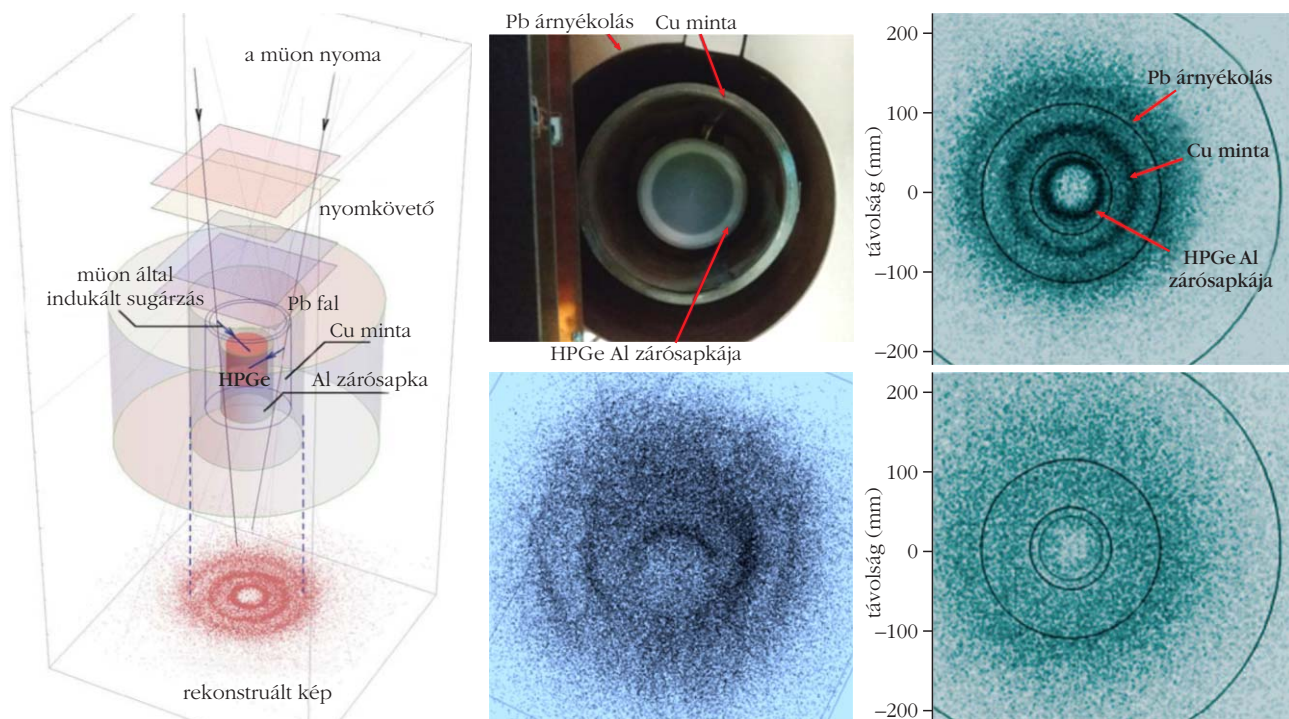
Kis sűrűségű anyagok képalkotására kifejlesztettünk egy berendezést az Újvidéki Egyetem (University of Novi Sad) munkatársaival, amely egy közeli katódos kamrákon (CCC) [7] alapuló nyomkövető detektorból és egy nagytisztaságú germániumdetektorból (HPGe) épül fel [8]. A 4. ábra bal oldalán látható a mérési elrendezés vázlatos rajza. A berendezés a következőképpen alkot képet a HPGe-detektorba helyezett kis sűrűségű mintáról, például az ábrán látható réz cilinderről: a HPGe-detektor felett elhelyezett

CCC-alapú nyomkövetővel megmérjük a müonok pályáját  $1,5 \text{ mm}$ -es helyfelbontással, a müonok ionizációja által keltett elektronok fékeződnek a minta anyagát alkotó atomok magjának környezetében (fékezési sugárzás) és az elveszített mozgási energiájuk sugárzássá alakul, fotonok keletkeznek, amelyeket a HPGe-vel detektálunk, energiájukat megmérjük. A HPGe-detektor a CCC-kamrák együttes jelére végez mérést körülbelül  $1 \mu\text{s}$  átlagos késleltetéssel. Kiválogatva azokat az eseményeket, amelyekben a müonok mellett  $6,4 \text{ MeV}$ -nél kisebb energiájú fotonokat is detektálunk, a müonok nyoma kirajzolja a mintát. A minta képét alkotó pontok száma az anyag sűrűségével arányos.

A 4. ábra közepén és jobb oldalán látható egy mérési elrendezés a réz mintával (középen fent), a mintáról az új módszerrel készített kétdimenziós (jobbra fent) és háromdimenziós (középen alul) képek, valamint a mérési elrendezés szimulációja (jobbra alul). A képek elkészítése 12 órányi adatfelvételt igényelt, amely durván egy nagyságrenddel kevesebb idő, mint ami a müonok elnyelődésén vagy szóródásán alapuló eljárásokhoz szükséges. Jól láthatóan elkülönül egymástól a réz minta és a HPGe-detektor alumínium fala. A HPGe-detektor kristályáról nem alkotunk képet, mert a müonok  $60 \text{ MeV}$  energiájú fotonokat keltenek benne, amelyek a fentebb említett  $6,4 \text{ MeV}$ -es energiavágás felett vannak.

Szcintillátordetektorok felhasználásával építettünk egy alkalmazásközeli berendezést is, amely segítségével csontokról és élő szövetekről alkottunk képet

4. ábra. Balra a kozmikus müonok és a másodlagos fotonok együttes detektálásán alapuló képalkotási eljárás sematikus rajza [8]. Középen és jobbra az első, kozmikus müonok nyomkövetésével előállított képek egy kis sűrűségű anyagról: a mérési elrendezés fotója (középen fent), a mérési elrendezésről készített kétdimenziós kép (jobbra fent), a mérési elrendezés három dimenziós képe (középen alul) és a mérési elrendezés alatt készített kép (jobbra alul) [8].



néhány óra időtartamú mérésekkel [9]. Következő fejlesztések és mérések célja a kis sűrűségű anyagok azonosítása, valamint a leképezés észszerűbb időtartamra (néhány perc) történő csökkentése.

A fenti eredmények demonstrálják a kis sűrűségű anyagok képalkotására kifejlesztett berendezés és az eljárás működését. Jelen eredmények felkeltették az európai fizikus szakma érdeklődését: cikkünkről rövid leírás jelent meg a *CERN Courier* 2016/07 és az *Europhysics News* 2016/08 lapokban.

#### Irodalom

1. H. K. M. Tanaka és mtsai., *Earth and Planetary Science Letters* 263 (2007) 104–113.

2. L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, D. Varga, *Advances in High Energy Physics* (2013) 560192.
3. Surányi G., Molnár G., Barnaföldi G., Hamar G., Melegh H., Oláh L., Varga D., *Karsztfejlődés XXI.* (2016) 203–216., DOI: 10.17701/16.203-216
4. H. K. M. Tanaka és mtsai., *Nat. Commun.* (2014) 5:3381. doi: 10.1038/ncomms4381.
5. D. Varga, G. Hamar, G. Nyitrai, L. Oláh, *Advances in High Energy Physics* (2016) 1962317.
6. G. Hamar, T. Kusagaya, L. Oláh, H. K. M. Tanaka, D. Varga: *Muographic Observation System* (2016) PTZATA153, szellemi tulajdon
7. D. Varga, G. Kiss, G. Hamar, Gy. Bencédi, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 698 (2013) 11.
8. I. Bikit, D. Mrdja, K. Bikit, J. Slivka, N. Jovancevic, L. Oláh, G. Hamar, D. Varga, *European Physics Letters* 113 (2016) 58001.
9. D. Mrdja, I. Bikit, K. Bikit, J. Slivka, J. Hansman, L. Oláh, D. Varga, *European Physics Letters* 116 (2016) 48003.