

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXI. évfolyam

12. szám

2011. december

KINCSKERESÉS KOZMIKUS MÜONOKKAL

– avagy kozmikus müondetektálás alkalmazott kutatásokban

Barnaföldi Gergely Gábor, Bencédi Gyula, Hamar Gergő, MTA KFKI RMKI
Melegh Hunor,¹ BME VIK
Oláh László,¹ ELTE TTK
Surányi Gergely, MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport
Varga Dezső, ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

A kozmikus sugárzást mintegy száz éve ismerjük. Felfedezéséhez egy egészen egyszerű megfigyelés vezetett: a feltöltött elektroszkópok töltésvesztése. A német *Theodor Wulf* szerzetes írta le először a jelenséget, amely háttérben a földkéreg kőzetének sugárzását sejtette. Homokkőbányákban végzett kísérletei azonban azt mutatták, hogy a töltésvesztés gyorsasága – az elvárásokkal ellentétben – nem növekszik, hanem éppen hogy csökken a mélyebben fekvő tárnákban. 1910-ben az Eiffel-torony tetején és alján elvégzett mérései után kézenfekvő volt, hogy így nem a földből, hanem az „égből érkező” sugárzásról lehet szó. Ezt támasztotta alá *Viktor Hess* „extrém” kísérlete 1912-ben: mintegy 5300 méteres magasságig emelkedett ballonjával, miközben folyamatosan mérte egy speciálisan kialakított elektroszkóp töltésvesztésének sebességét. Mérései eredményeként megállapította, hogy a magasság növekedésével a kozmikus sugárzás hatása erősödik. Vakmerő kísérleteiért, valamint a kozmikus sugárzás felfedezéséért és vizsgálatáért 1936-ban Nobel-díjat kapott (*1. ábra*).

Ezek a felfedezések egy új kutatási irányt nyitottak meg, amelyhez a magyar *Jánossy Lajos* munkássága is kapcsolódott. Jánossy az '50-es években Magyarországra hazatérve létrehozta a KFKI Kozmikus Sugárzási Laboratóriumát, ahol villanólámpás GM csövek segítségével kozmikus részecskék hozamát, illetve szögeloszlását vizsgálta (*1. ábra*), majd mérései megértéséhez új, statisztikus eljárást, az elméleti kaszkádmodellrel fejlesztett ki.

¹ MSc egyetemi hallgató

A kozmikus sugárzás

A Földünket folyamatosan bombázó nagyenergiás kozmikus részecskéket több mint egy évszázada vizsgáljuk, így az ionizáló sugárzás mibenlétéről a kísérleti megfigyelések alapján egyre pontosabb képet kaptunk. Kísérletek segítségével bebizonyították, hogy a világűrben terjedő kozmikus sugárzásban az elektromágneses sugárzás mellett több komponens is jelen van, amelyek elsősorban protonokból (89%), további stabil atommagokból (10%) és elektronokból (1%) állnak. E nagyenergiás primer részecskék a közel 20 km-es magasságban, a ritka felsőléggör O és N atommagjaival ütközve másodlagos részecskezápороkat keltenek. A részecskezápороk az erős kölcsönhatás törvényei szerint fejlődnek, elsősorban pionokat tartalmaznak (π^0 , π^\pm), amelyekből β -bomlással müonok (μ^\pm) keletkeznek.

A müonok felfedezése önmagában is szorosan kapcsolódik a kozmikus sugárzáshoz, hiszen 1937-ben *C. D. Anderson* és munkatársai elsőként kozmikus sugárzásban mutatták ki ezt, az elektronnál 200-szor nehezebb negatív töltésű leptonfajtát. A müonok 2,2 μ s alatt bomlanak el elektronra és neutrínókra, és mivel közel fénysebességgel haladnak, ennyi idő alatt alig néhány száz métert tehetnek meg. Azonban számukra, mivel gyorsak, lassabban telik az idő – ez a relativisztikus idődilatáció jelensége – ami miatt eljutnak Földünk felszínére, illetve kellő energia esetén akár a földkéregbe is. A másodlagos részecskék keletési mechanizmusa megegyezik a nagyenergiás részecskegyorsítókban mesterségesen előállított atommag-atommag ütközésekbeli folyamatokkal, ám

- ritkábban fordulnak elő,
- energiájuk akár több nagyságrenddel is nagyobb lehet,

- a keltett részecskezapor több km² területen „szóródik szét” a földfelszínen.

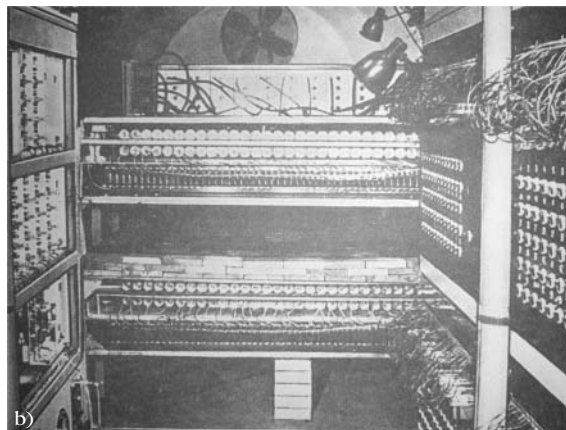
A napszél a kozmikus részecskék egyik forrása, azonban kozmikus müonok kelteéséhez túlzottan alacsony energiájú. A felszint elérő müonok forrása a Galaxison belüli és kívüli speciális csillagászati objektumok, „kozmosz részecskegyorsítók”, például gyorsan forgó, nagy mágneses térrel rendelkező csillagmaradványok. A primer részecskék megjelenési valószínűsége jó közelítéssel az energia harmadik hatványával fordítottan arányos, energiájuk nagy ritkán akár a 10²⁰ eV-ot is elérheti (évente néhány száz négyzetkilométerenként egy) [2], ami megfelel egy jól megütött teniszlabda energiájának. A sugárzásból felszínre jutó müonok intenzitása jelentős, tenyerünkön másodpercenként körülbelül egy halad át, átlagos energiájuk néhány GeV (10⁹ eV), egy átlagos radioaktív bomlás energiájának ezerszerese.

A mért részecskehozam, tekintve hogy forrása nem a Nap, időben nagyjából állandó, pontos mérésekkel azonban a naptevékenység és napszakváltozás (a Föld mágneses terének módosulása miatt), valamint az évszakok váltakozása (légkör állapota) is kimutatható benne.

A földfelszínen állva rajtunk is folyamatosan áthaladnak müonok, másodpercenként mintegy 5-10 részecske (részei tehát a természetes radioaktív háttérsugárzásnak). Ez a sugárzás veszélytelen, azonban vizsgálatuk részecskefizikai szempontból izgalmas és aktív kutatási terület, sőt alkalmazott kutatásokra is lehetőséget ad.

Kozmikus sugárzás alkalmazott kutatásokban

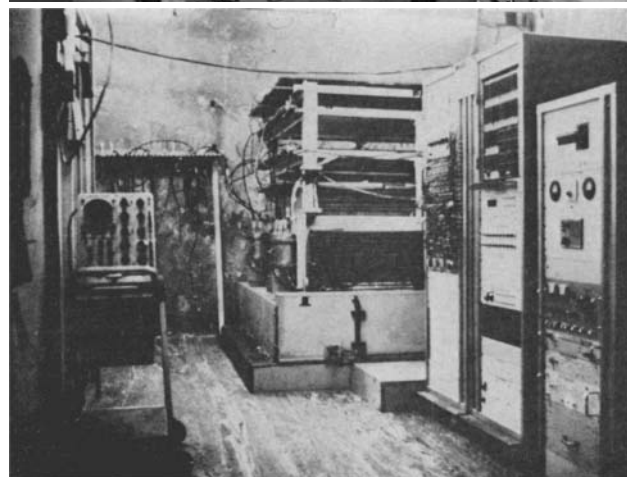
A kozmikus sugárzás tulajdonságainak beható vizsgálatából származó eredmények már a múlt század közepén lehetőséget teremtettek olyan alkalmazott kutatási projektek elindítására, amelyek a kozmikus részecskezaporok tulajdonságain alapulnak. Az első felhasználás *E. P. George* nevéhez fűződik, aki az ausztrál hegyekben próbálta meghatározni a hórétegek vastagságát a kozmikus müonok hozamának változásait vizsgálva. Ezt követte – a későbbi Nobel-díjas – *L. W. Alvarez* által vezetett régészeti kutatás, amely a Kefren-piramis belsejének feltérképezésére irányult. Alvarez és munkatársai 1966-ban egy mintegy 1,8 m²-es detektort helyeztek el a korábban a piramis alá fúrt, mesterséges Belzoni-kamrába. A több rétegben elhelyezett szikrakamrákból álló müonte-

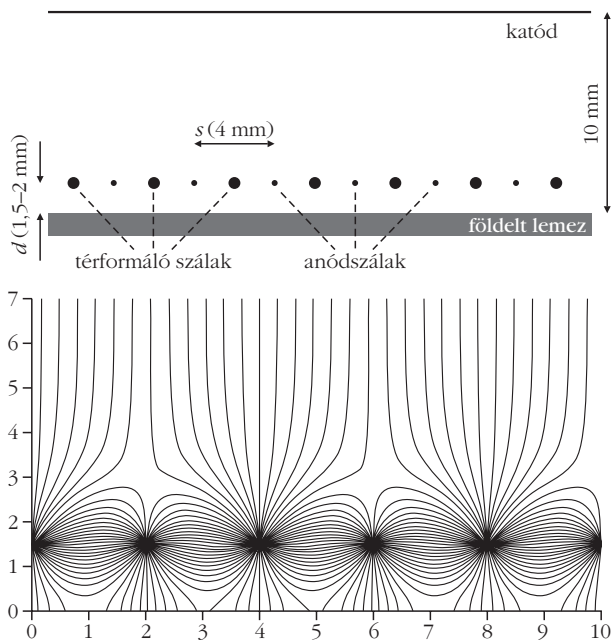
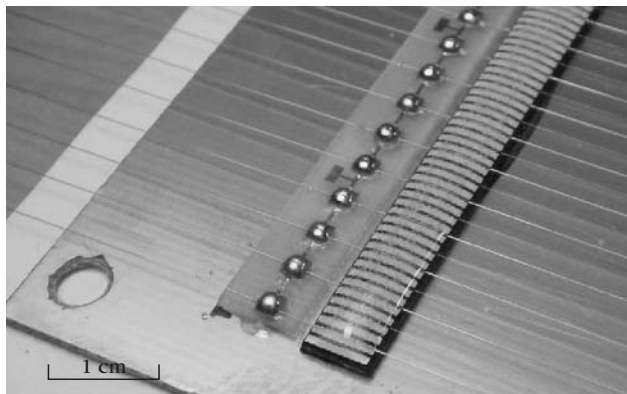


1. ábra. Az „extrém” kísérlet előtt készített fényképfelvételek Viktor Hessről (a). Kozmikus részecskék mérése a KFKI területén található Jánossy-féle aknában (b) (1958–1986) [1].

leszkóppal – egy évnyi adatgyűjtés után – megállapították, hogy az ismert kamrákon kívül nincsenek 1 m-nél nagyobb átmérőjű rejtett üregek a piramis belsejében (2. ábra). Munkájuk megkímélte az egyiptomi régészeket, hogy feleslegesen megbontsák a piramis szerkezetét, hagyományos módon keresve a rejtett kincseskamrákat [3].

2. ábra. A szikrakamrákból összeállított müondetektor tesztelése a Berlekey laboratóriumában (L. W. Alvarez, A. Fakhry, és J. Anderson), majd mérés a Kefren-piramis Belzoni-kamrájában [2].





3. ábra. A közelkatódos kamra szerkezete és a benne kialakuló elektromos tér erővonalai [8]. A felső tartomány egyenletes télerőségű részéből a mérendő részecske által keltett elektronok a szálakhoz vándorolnak, ahol számuk lavinaszerűen sokszorozódik.

Az elmúlt évtizedekben az Alvarez által javasolt eljárásához hasonló módszert többféle kutatásban is alkalmazták, elsősorban olyan extrém helyeken, ahol a mechanikai fúrás nem megoldható vagy nem kifizetődő. Napjainkban igen népszerű ez az alkalmazott kutatási irány: japán kutatók az Asama-vulkán tevékenységét vizsgálják emulziós ködkamrák segítségével [4]; a Los Alamos-i kutatóintézet munkatársai olyan berendezés kifejlesztésén dolgoznak, amellyel radioaktív forrás alkalmazása nélkül vizsgálhatják át a határon átkelő járműveket [5]; a Mexikói Állami Egyetem kutatói pedig sokszálas proporcionális kamrák (Multi-Wire Proportional Chamber – MWPC) segítségével kutatják a mexikói Teotihuacanban található Nap-piramis belső szerkezetét [6].

Történetileg függetlenül építettük meg a REGARD (RMKI-ELTE Gaseous Detector Research and Development) [7] csoport müontomográfját geológiai kőzet-inhomogenitások és ércelérek keresésére, illetve hazai barlangokban ismeretlen járatok feltérképezésére.

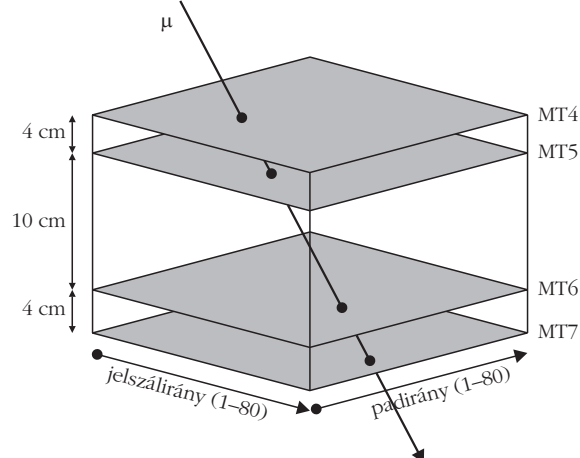
A müontomográf szerkezete és működése

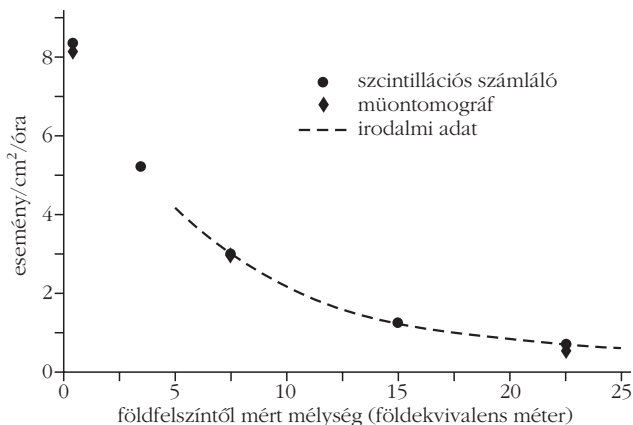
A müontomográf feladata, hogy a rögzítse a rajta áthaladó töltött részecskék pályadatait. Tipikusan több, párhuzamosan elhelyezett detektorlemezről építhető, amelyeknek minél nagyobb határfokkal és felülettel kell rendelkezniük. A korai detektorok szikrakamrák voltak, ám ismert emulziós detektorból, sokszálas proporcionális kamrákból, illetve szcintillációs detektorokból felépített berendezés is. Ideális esetben a detektorlemezek okozott beütések által megadott kétdimenziós koordinátákból számolható az áthaladt részecske egyenes pályája. Ezt az elvet alkalmazva építettük meg négy darab, egyenként két dimenzióban érzékeny, speciális technológiájú proporcionális kamrából [8] a müontomográfunkat.

A saját fejlesztésű sokszálas kamrák $18\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ nagyságú érzékeny felületűek, argon és szén-dioxid gázok keverékével töltve. A sokszálas proporcionális kamra detektálóképességének alapja, hogy egy rajta keresztülhaladó töltött részecske ionizálja a gázt, centiméterenként mintegy 100 elektront keltve. Az elektronok a kamrában alkalmazott elektromos tér hatására a vezető szálak közelében annyira felgyorsulnak, hogy tovább ionizálva a gázt elektronlavinát keltenek (akár 10^5 – 10^6 darab elektront). Ezen töltésmennyiség már jól mérhető, időskálája pedig a mikroszekundum nagyságrendjébe esik.

A kamrához kétféle szálát használtunk: a vastagabbak ($100\text{ }\mu\text{m}$ átmérőjűek) az úgynevezett térformáló szálak, a vékonyak ($21\text{ }\mu\text{m}$ átmérőjűek) a pozitív feszültségű „jelszálak”, amelyeken a fent említett elektronsokszorozás történik. A detektor teljes vastagsága 1 cm. A szálak alatt 1,5 mm távolságra elhelyezkedő földpotenciálú lapot merőleges futású, $4\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ nagyságú csíkokkal szegmentáltuk (pad), így a szálakra merőleges irányban is megfelelő helyfelbontást érhetünk el. Egyetlen kamra alkalmas egy részecske áthaladási helyének kétdimenziós mérésére, amelyet digitális jelként olvasunk ki. A kifejlesztett detektor, ami a „közelkatódos kamra”, angol rövidítéssel CCC (Close Chotode Chamber) nevet kapta (3. ábra), legfontosabb

4. ábra. A 4 párhuzamos síkú közelkatódos kamrából épített müontomográf vázlatos rajza.





5. ábra. A müonhozam mélységfüggése a Jánossy-aknában. Jól látható, hogy a müontomográfal mért müonhozam (rombuszok) megegyezik a szcintillációs számlálóval (körök) mérttel és az irodalmi adatokkal (szaggatott vonal).

előnye az eddig használt eszközökhöz képest, hogy könnyű szerkezetűek (100–150 g), valamint egyszerű és ellenálló konstrukciójúak, mivel toleránsak a sokszálas detektor működését veszélyeztető (10–100 μm nagyságú) pontatlanságokkal szemben [8].

Az általunk használt elrendezésben a tomográf négy detektorból állt, két párra osztva, egymástól 4 – 10 – 4 cm távolságban (4. ábra). Ezzel mindkét dimenzióban négy mérési pontot kaptunk. A minimálisan szükségesnél több detektor alkalmazása a nagyenergiás fizikában bevett szokás: két detektor elég lenne a pálya irányának megadásához, három esetén az illesztett egyenes pontossága ellenőrizhető (más forrásból származó háttér csökken), négy detektornál viszont az is megengedhető, hogy bármelyik ne szóljon meg. A rendszer teljes hatásfoka így (legalább három detektor jelez a négyből) 95% fölötti volt.

Kozmikus müonok vizsgálata a detektor segítségével

Detektorunkat a földfelszíni próbák után elsőként a KFKI területén található, Jánossy Lajos által 1951-ben épített 32 méter mély aknában teszteltük. Az aknában a felszíntől számítva 10 méterenként sugarasan szétfutó, összesen 6 darab táró található. Tekintettel arra, hogy a Jánossy-akna szerkezeti rajzai rendelkezésre álltak, így ismert geometriájával kiváló lehetőséget teremtett tesztelésre: azaz a müonok elnyelődési hányadának meghatározására adott mélységben, ami a szakirodalomból már eléggé pontosan ismert. A kapott eredmények segítségével könnyen becsléseket tehetünk más anyagi környezetben, más mélységeken végzett föld alatti vizsgálatok optimális mérési idejére – még detektorunk odahelyezése előtt.

A müontomográfal az RMKI Gázdetektor Laboratóriumában, valamint a Jánossy-akna –1. és –3. szintjén végeztünk méréseket. A mérésekkel egy időben egy szcintillációs detektort is üzemeltettünk, amely két szcintillátor együttes megszólalásait (koincidenciáit) számolta, csökkentve ezzel a földi eredetű sugárzásból adódó

háttérrel. A mérések kiértékelése során figyelembe vettük a detektorok felületéből, látószögéből és a mérések idejéből adódó müonhozam-különbségeket is. A 5. ábrán a mérési eredményekből jól látszik, hogy a müontomográfal (rombuszok) mért müonhozam megegyezik a szcintillációs számlálóval (körök) mért eredményekkel valamint az irodalmi adatokkal (szaggatott fekete) [9]. Az eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy detektorunk megfelelően méri a müonhozamot. A müonok száma a talajban lefelé haladva gyorsan csökken, tehát érzékeny a detektor feletti anyagmennyiség változására. A müonok számának csökkenése miatt viszont a komolyabb, nagy statisztikájú (mintegy millió detektált müon) vizsgálatokhoz már több napos folyamatos mérésre van szükség.

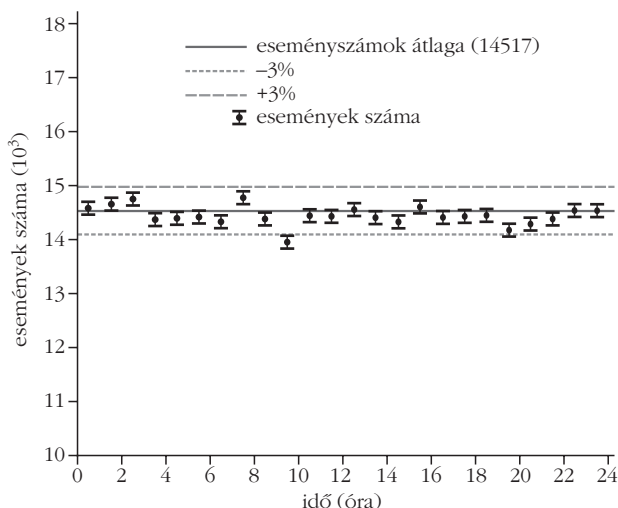
A bevezetőben utaltunk arra, hogy a kozmikus sugárzás időbeli ingadozása kicsi. Ezt számszerűsítve becslést adhatunk arra, hogy a Nap mennyiben járul hozzá a müonfluxushoz, amennyiben különbségnek kell mutatkoznia a nappal és éjszaka mért müonok száma között.

Több hosszú mérés alapján készült a 6. ábra, amely a müonesemények időbeli eloszlását mutatja, óras bontásban a nap 24 órájának megfelelően. Látható, hogy az óránként beérkező kozmikus müonok száma nem mutat 3%-nál nagyobb ingadozást, tehát méréseink szempontjából a napi időfüggést elhanyagolhatjuk [10].

A detektorunkon keresztülhaladó müonok irányfüggésének pontos ismerete kitüntetett jelentőséggel bír, tehát megmértük a kozmikus részecskék földfelszíni és föld alatti szögeloszlását.

Ismert tény, hogy a világűrben a kozmikus részecskék irányeloszlása egyenletes, méréseink szerint viszont a müonok száma láthatóan csökken, ha a zenithez képesti megfigyelési szöget növeljük. Ennek oka, hogy a zenit felé a legvékonyabb a légkör vastagsága, amin a felső atmoszférában keletkező müonoknak át kell hatolnia [11]. A felszínre csak azok jutnak el, amelyek elegendő energiával rendelkeznek: függőleges irányban körülbelül 1,5 GeV energiát vesztenek a müonok, más szögekben a szög koszinuszával fordítottan arányosan többet. Mindez azt is jelenti, hogy ha

6. ábra. A müonesemények napi időeloszlásának vizsgálata.

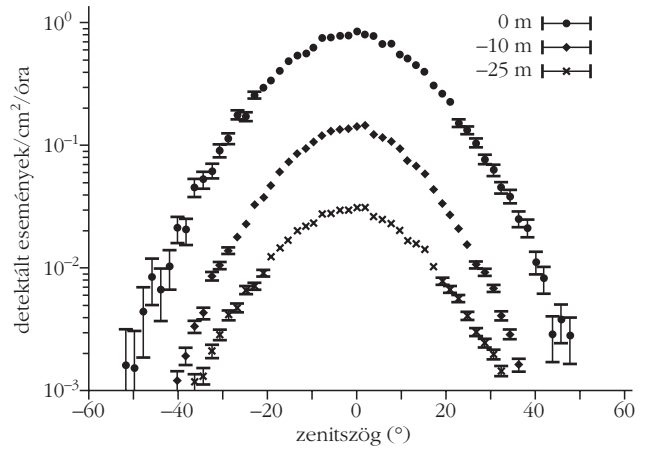
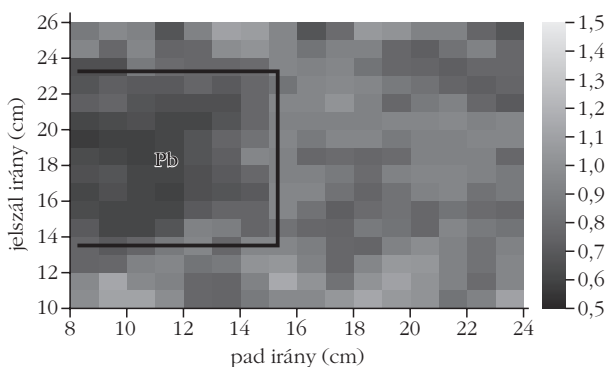
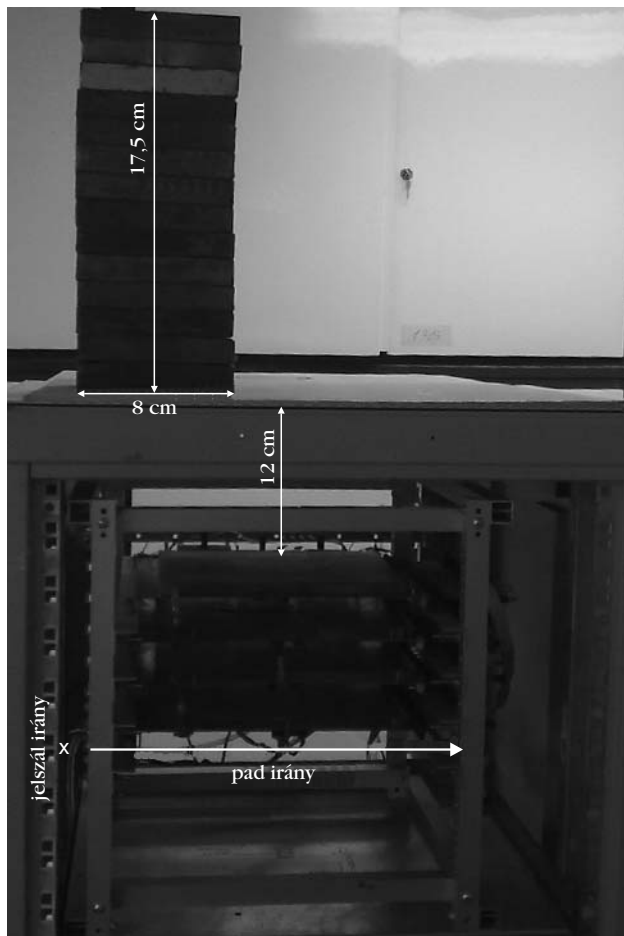


mélyebbre megyünk a talajban, a szögeloszlás alakja kis mértékben megváltozik, amit a 7. ábrán látható méréseink is igazoltak. Ha a talaj anyageloszlása nem egyenletes, az a fenti szögeloszlás további változását okozza; például egy üreg az adott irányban a müonszám növekedését eredményezi.

Szerkezetvizsgálat müonokkal

A berendezés szempontjából legérdekesebb kérdés, hogy alkalmas-e nagy kiterjedésű tárgyak anyagsűrűségének leképezésére. Ennek közvetlen demonstrálására a müontomográf felett 12 cm-es magasságban

8. ábra. A müontomográf érzékenységét vizsgáló kísérleti összeállítás az ólomtoronnyal és az ólomtorony müonképével.



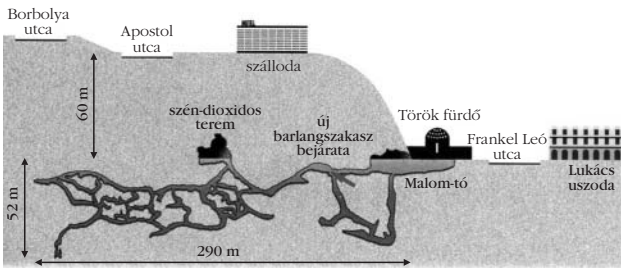
7. ábra. Müonhozam szögfüggése a földfelszínen, valamint 10 m és 25 m úgynevezett földekvivalens mélységeken.

építettünk egy 8 cm × 8 cm × 17,5 cm méretű ólomtoronyt (8. ábra), majd több mint száz ezer egyedi müoneményt vettünk fel: először az ólomtoronnyal, majd anélkül. Feltételezésünk az volt, hogy a két leképezés különbségeként előáll az ólomtömb vetületi müonképe. A 8. ábra felső részén látható a relatív intenzitás két dimenzióban. Az ábra alsó részén jól kivehető a körülbelül 15%-os intenzitáscsökkenés az ólomtorony helyén.

A kozmikus müonokra tekinthetünk úgy, mint természetes „röntgensugárzás”-ra, ami kis intenzitása és nagy áthatolóképessége miatt nagy méretű objektumok belső vizsgálatára optimális, néhány tíz centiméteres, de inkább méteres felbontóképességgel. Van, hogy más vizsgálati módszerek nem megbízhatóak, ilyenkor egyedülálló lehetőséget jelent a kozmikus müonok mérése: például barlangüregek vizsgálata esetén a kőzet repedésszerű szerkezete miatt az akusztikus vagy vezetőképességen alapuló mérési eredményeket érdemes például müontomográfival ellenőrizni.

Müonleképezés a budapesti Molnár János barlangban

A müontomográf, mint részecskedetektor, eredeti elrendezésében ellenőrzött laboratóriumi körülmények között kellett működjön – ilyenre jó példa, hogy a berendezés nagyon sokban hasonlít ahhoz, amit a CERN ALICE VHMPID (Very High Momentum Particle Identification Detector – nagyon nagy impulzusú részecskeazonosító) [12] berendezéshez készít kutatócsoportunk. Egy barlangrendszer egyáltalán nem klasszikus laborkörnyezet: a legnagyobb kihívást a közel 100%-os páratartalom jelenti. A nagy páratartalom miatt az eszköz magasfeszültségű elektródái közt a szigetelőanyag felületi vezetése megnövekszik, és a kialakuló mikroszkopikus szikrák (amelyek kicsit hasonlítanak arra, ahogy a nagyfeszültségű vezetékek „zúgnak” esőben) lehetetlenné teszik a mérést. Feladatunk tehát az volt, hogy a berendezés számára száraz környezetet biztosítsunk.



9. ábra. A József-hegy GoogleEarth által készített távlati képe, valamint a müontomográf helye és látószöge a 2. mérés során a Molnár János barlangban a József-hegy Ny–K irányú metszetén [13].

Fontos technikai kérdés az, hogy a detektort még ember számára is nehezen járható barlangi útvonalon, kézben kell lejutatni a mérés helyére. Azontúl, hogy ez a berendezés méretét limitálja, jelentős igénybevétel, elővigyázatos szállítás ellenére is mechanikai sokkot jelent. Az alkalmazott, fent ismertetett közelkatódos technológia optimális választás ilyen szempontból, ami felépítésénél fogva jól viseli a mechanikai behatásokat, a deformációból eredő pontatlanságokat.

A laboratóriumi vizsgálatok és tesztek után a müontomográfot és a hozzá kapcsolódó elektronikákat egy stabil, légmentes dobozba zártuk, majd ezzel a detektorral végeztünk méréseket a budapesti Molnár János barlang extrém körülményei között. A detektor működéséhez szükséges argonkeverék a kamrákból a doboz belsejébe áramlott, biztosítva az elegendően alacsony (60% körüli) páratartalmat a kis mennyiségben bejutó nedves levegő ellenében. 2011. január 16-án telepítettük a müontomográfot a barlangba, majd kis megszakításokkal 3 hónapnyi adatot vettünk fel a barlang egy mesterségesen kialakított, elektromos hálózattal rendelkező tárójában.

A Molnár János barlang a József-hegy keleti oldalán található. Száraz felső ága a Frankel Leó úti Malom-tó felett helyezkedik el mintegy 12 m-rel. A barlang – több forrás által táplált – vize látja el termálvízzel a Lukaács fürdőt is. A barlang – eddig ismert közel 7 km-es hosszának – több mint 95%-a víz alatt van, azonban legnagyobb levegős kamrájához egy mesterségesen kialakított táró is vezet [13]. A müontomográfal e táró 3 pontján végeztünk 3-3 hetes méréseket (9. ábra).

A különböző mélységeken végzett mérésekből – ismerve a müonhozam mélységfüggését – a kapott müonhozam ismeretében kiszámolhattuk a detektor

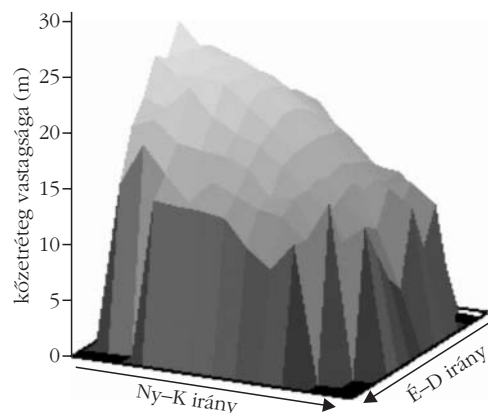
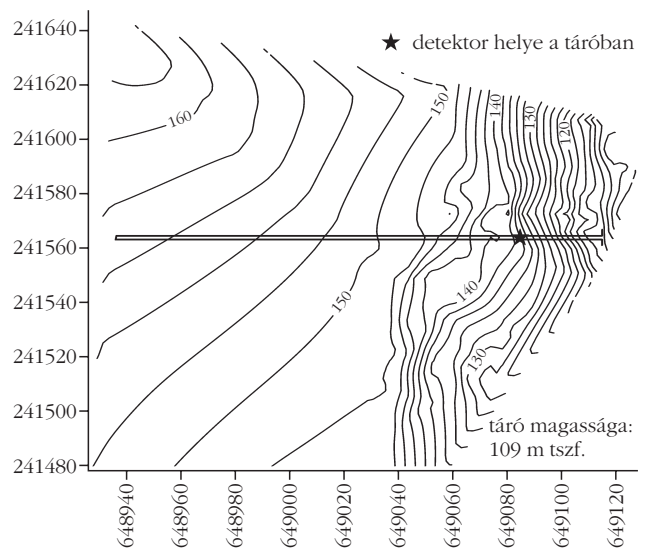
feletti földréteg vastagságát. Ehhez egy egyszerűsített modellt használtunk: a Jánossy-aknában végzett müonhozam-méréseink eredményei alapján azt feltételeztük, hogy a müonok elnyelődése közel exponenciális a 10–60 m-es dolomitos kőzetrétegben (a feltételezésből származó hiba kisebb az egyéb hibaforrásokhoz képest). Mivel a detektor két dimenzióban (két irányban) függetlenül mér, meghatározható volt a detektor feletti kőzetréteg-vastagság kétdimenziós képe. Egyenletes kőzetsűrűséget feltételezve kirajzolható a felszín háromdimenziós alakja, ami a 10. ábrán látható.

A 10. ábra alapján összegzőként elmondható, hogy első kvalitatív eredményeink azt mutatják: a közelkatódos kamrákból épített müontomográf néhány méteres pontossággal alkalmas kőzetfelületek, kőzetinhomogenitások vizsgálatára.

Összefoglalás – kitekintés

A REGARD csoport által kifejlesztett és megépített müontomográfot sikeresen teszteltük, megmutatva, hogy a nagyenergiás fizikában használt speciális de-

10. ábra. A József-hegy általunk készített szintvonalas térképe EOV koordináta-rendszerben, ahol a csillag jelöli a detektor helyét a Molnár János barlang mesterséges tárójában, illetve a kozmikus müonok mérése alapján készített domborzat rekonstrukciója.



tektorteknika átültethető hétköznapi alkalmazásokba – akár extrém körülmények között. Detektorunk sikeresen vizsgázott a budapesti Molnár János barlangban. Ezek után elkészült a második müontomográf prototípus is: korábbi tapasztalataink alapján kompaktabb, praktikusabb, automatizált eszközt készítettünk, amelyet geológiai és barlangkutatásban szeretnénk használni.

Zárszó, köszönetnyilvánítás

Az itt ismertetett kutatásokban alkalmazott CCC kamrák a CERN LHC ALICE kísérlet egyik tervezett aldetektora, amelyet a VHMPID tervezése során fejleszt ki a REGARD csoport és az ALICE-Budapest csoport [12]. A csoport tagjainak döntő hányada BSc/MSc/PhD hallgató, akik a kutatásfejlesztés szinte minden szintjén részt vesznek a munkálatokban. A szerzők köszönetüket fejezik ki a Rózsadombi Kinizsi Barlangász Egyesületnek és az Ariadne Barlangkutató Egyesületnek. További köszönet illeti *Bognár Csabát* és *Adamkó Pétert* a Molnár János barlangban nyújtott segítségért. Kutatásainkat az OTKA CK77719, CK77815, NK77816, PD73596 pályázatok valamint az MTA Bolyai János kutatási ösztöndíja (BGG, VD) támogatták.

Irodalom

1. Jéki L.: KFKI. Artéria Stúdió, Budapest, 2001.
2. K. Nakamura és mtsai: The Review of Particle Physics. *J. Phys. G* 37(2010) 075021.
3. L. W. Alvarez és mtsai: Search for Hidden Chambers in the Pyramids. *Science* 167(1970) 832–839.
4. Hiroyuki K. M. Tanaka és mtsai: High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. *Earth and Planetary Science Letters* 263 (2007) 104–113.
5. L. J. Schultz, K. N. Borozdin és mtsai: Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography. *Nucl. Instrum. Method A* 519 (2004) 687.
6. R. Alfaro, V. Grabski és mtsai: Searching for possible hidden chambers in the Pyramid of Sun. Proceedings of 30th International Cosmic Ray Conference 5, 1265 (2008)
7. REGARD csoport weblapja: <http://regard.kfki.hu/>
8. G. Hamar, G. Kiss, D. Varga: Asymmetric Multiwire Proportional Chamber With Reduced Mechanical Tolerances. *Nucl. Instrum. Meth. A* 648 (2011) 163.
9. L. N. Bogdanova és mtsai: Cosmic Muon Flux at Shallow Depths Underground. *Physics of Atomic Nuclei* 69/8 (2006) 1293.
10. Kobzi Balázs, Sajtos László: Kozmikus müonok kísérleti vizsgálata. OTDK dolgozat, ELTE, 2008.
11. Jeng-Wei Lin és mtsai: Measurements of angular distribution of cosmic-ray muon rate. *Nucl. Instrum. Meth. A* 619 (2010) 24.
12. A. G. Agócs és mtsai: VHMPID Letter of Intent CERN-ALICE. Megjelenés alatt (2011)
13. Surányi G., Dombrádi E., Leél-Őssy Sz.: Contributions of geophysical techniques to the exploration of the Molnár János Cave (Budapest, Hungary). *Acta Carsologica* 39/3 (2010) 565.