

Kozmikus müonok elnyelődése vas és ólom abszorbensben

Kálmán Dávid¹, Oláh László¹, Barnaföldi Gergely Gábor², Belgya Tamás³, Hamar Gergő²,
Kis Zoltán³, Melegh Hunor Gergely⁴, Surányi Gergely⁵, Takács Kálmán³, Varga Dezső¹

¹ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tsz.

H-1117, Budapest, Pázmány Péter Sétány 1/A.

²MTA Wigner FK Részecske- és Magfizikai Intézet,

H-1121, Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

³MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium,

H-1121, Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

⁴Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,

H-1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3-9.

⁵MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport,

H-1117, Budapest, Pázmány Péter Sétány 1/C.

A földfelszínt folyamatosan bombázzák nagyenergiás részecskék, amelyek égi eredete éppen 100 éve nyert bizonyítást. A primer kozmikus sugárzás jórészt protonokból áll, amelyek az Univerzum legenergetikusabb részecskéi, a leggyorsabbak közülük a CERN Nagy Hadronütköztetőjének (LHC) maximális, TeV-es energiáit is jóval túlszárnyalják. A kozmikus protonok a felsőlégkör atommagjaival ütközve részecskezáporkat keltenek, amelyek müonkomponensei eljutnak akár a földfelszín alá is. Mérésünkben a REGARD csoport által kifejlesztett müontomográf segítségével néhány GeV energiájú kozmikus müonok elnyelődését vizsgáltuk vas és ólom abszorbensekben. Kísérletünk eredményeit összehasonlítottuk korábbi, különböző mélységű, földfelszín alatti méréseinkkel.

Kozmikus müonok és detektálásuk

Idén ünnepeltük a kozmikus sugárzás felfedezésének centenáriumát. A Viktor Hess híres kísérletei [1] óta eltelt évszázad során egyre jobban megismerhette az emberiség a kozmikus eredetű ionizáló sugárzást. E kísérletek segítségével bebizonyították, hogy a világűrben terjedő primer kozmikus sugárzás többkomponensű: elsősorban protonokból (89%), stabil atommagokból (10%) és elektronokból (1%) áll. Megfigyelésekkel igazolták, hogy ezek a nagyenergiás primer részecskék tipikusan 30 km-es magasságban, a ritka felsőlégkör O és N atommagjaival ütközve másodlagos részecskezáporkat keltenek. A részecskezáporkokban – az erős kölcsönhatás törvényei szerint – elsősorban pionok (π^0 , π^\pm) keletkeznek, amelyek β -bomlással müonokká (μ^\pm) alakulnak. A müonok a nyugalmi rendszerükben 2,2 μ s felezési idővel bomlanak el elektronra és neutrínóra, azaz keletkezési helyüktől – közel fénysebességgel haladva – mintegy 660 métert tehetnek meg. A valóságban azonban – a relativisztikus idődilatáció jelensége miatt – eljutnak Földünk felszínére, sőt akár a földkéregbe is.

Noha a másodlagos részecskék keltési mechanizmusa megegyezik a nagyenergiás részecskegyorsítóknál mesterségesen előállított proton-atommag, vagy atommag-atommag ütközések során lejátszódó folyamatokkal, a

kozmosz ütközések ritkábban fordulnak elő, esetenként nagyobb energiájúak és a keltett részecskezápor több km² területen éri el a földfelszínt.

A keltett részecskezáporkok detektálására több, nagy kiterjedésű detektorrendszert építenek. E detektorok pontos méréseivel kimutatható akár a naptevékenységtől és napszakoktól függő változás (a Föld mágneses terének módosulása miatt), valamint az évszakok váltakozásának hatása (légkör állapota) is. Kis felületen mért részecskehozam időben nagyjából állandónak tekinthető, pl. a földfelszínen állva testfelületünkön másodpercenként mintegy 20–30 müon halad keresztül. Ez a sugárzás számunkra veszélytelen, azonban a müonintenzitás mérése számos alkalmazási lehetőséget hordoz magában.

Alkalmazott kutatások kozmikus müonokkal

A kozmikus sugárzás tulajdonságainak beható vizsgálatából származó eredmények már a múlt század közepén lehetőséget teremtettek olyan alkalmazott kutatási projektek elindítására, amelyek a kozmikus részecskezáporkok intenzitásmérésén alapulnak. Az első alkalmazás E. P. George nevéhez fűződik, aki az ausztrál hegyekben próbálta meghatározni a hórétegek vastagságát a müonhozam változásait vizsgálva.

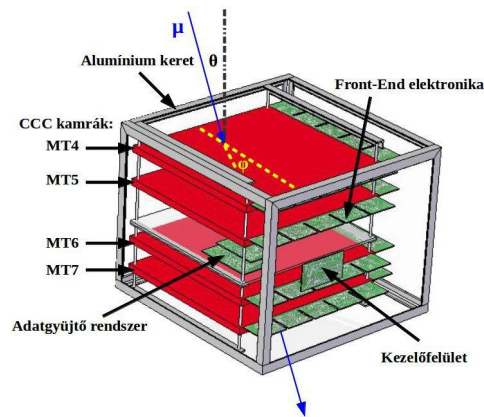
Később, 1968-ban L. W. Alvarez és munkatársai egy kozmikusrészecske-detektort helyeztek el a Kefren piramis Belzoni kamrájába kb. 100 méteres mélységben. A több rétegben elhelyezett 1,8 m²-es szikrakamrákból álló műonteleszkóp fél évnyi adatgyűjtés során mintegy 1 millió műiont mért. A mért műionhozamban nem volt intenzitásnövekedés a várthoz képest, ami azt jelentette, hogy az ismert kamrákon kívül nincsenek további, 1 m-nél nagyobb átmérőjű rejtett üregek a piramis belsejében. Munkájuk megkímélte az egyiptomi régészeket, hogy feleslegesen megbontsák a piramis szerkezetét, hagyományos módon keresve a rejtett kincsekamrákat [2].

A régészeti kutatásokban alkalmazott eljárás elterjedt a geofizikusok körében is, elsősorban olyan extrém helyeken, amelyek nem közelíthetők meg, vagy a hagyományos geofizikai módszerekkel (pl. mélyfúrás) nem oldhatók meg. Japán, francia és olasz geofizikusok a kozmikus műionok hozamát mérve vizsgálják a vulkánok sűrűségeloszlását rejtett lávakürtök (a várthoz képest kisebb műionhozamok) után kutatva, amelyek egy következő kitérés útjai vagy jelei lehetnek [3]. Barlangkutatók pedig rejtett barlangi üregek, járatok után kutattak Alvarez módszerével [4]. A kozmikus műionok elnyelődésének és Coulomb szórásának mérésével lehetséges a nagy sűrűségű nukleáris anyagok azonosítása is. A Los Alamosi Kutatóintézet munkatársai olyan berendezés kifejlesztésén dolgoznak, amely radioaktív forrás alkalmazása nélkül vizsgálhatja át a határon átkelő járműveket és a kikötőkbe érkező konténereket rejtett nukleáris anyagok után kutatva [5].

A REGARD (RMKI-ELTE Gaseous Detector Research and Development) csoport kifejlesztett egy olyan detektort, amely a fentebb felsoroltakhoz hasonló célra alkalmazható, ám azoknál költségkímélőbb, mobilisebb, infrastruktúrára, energiafelhasználásra és emberi felügyeletre tekintettel szerényebb igényű. Jelen cikkben bemutatjuk a REGARD csoport műiontomográfját, amelyet eddig geológiai kőzetinhomogenitások, ill. hazai barlangokban ismeretlen járatok feltérképezésére használtunk [6,7,8].

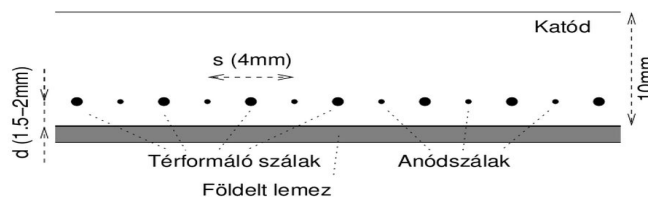
Kozmikus műionok detektálása műiontomográfjal

Egy kozmikusrészecske-detektor megtervezésénél törekedni kell a detektor érzékeny felületének maximalizálására, azonban környezeti alkalmazásoknál (pl. barlangkutatás, régészeti feltárás) a hordozhatóság limitálja ezt a detektálási felületet. A mobilitás jegyében készült a REGARD műiontomográf, amelynek tömege 13 kg, méretei: 51 cm × 46 cm × 32 cm. Az 1. ábrán látható a detektor, amely 4 darab egymás alatt párhuzamosan elhelyezett közelkatódos kamrából (Close Cathode Chamber, CCC) épül fel [9,10]. A műiontomográfot felépítő közelkatódos proporcionális kamrák működésének alapja a töltött részecskék által okozott ionizáció mérése. Az ionizáció fenntartása miatt a kamrákon folyamatosan argon (Ar) és széndioxid (CO₂) gázok 80:20 arányú keverékét áramoltatjuk keresztül. A kozmikus műionok (töltött részecskék) a kamrákon történő áthaladásuk során közel 100 elektront hoznak létre az 1 cm vastag detektorban. Ezeket az elektronokat a szálak közelében kialakuló térerősség annyira felgyorsítja, hogy további ionizációra lesznek képesek, majd lavina effektussal akkora töltésmennyiség (10³-10⁴ elektron) alakul ki, amely erősítés után mérhető jelet ad (10⁵-10⁶ elektron).



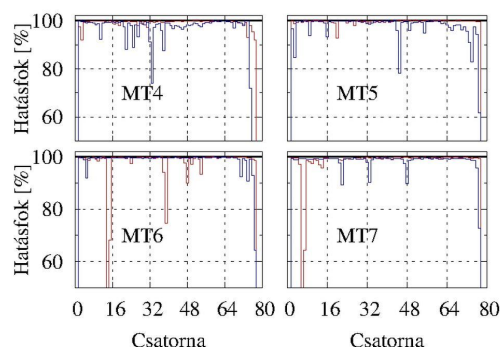
1. ábra: A REGARD műiontomográf felépítése.

A kamrák 32 cm × 32 cm × 1 cm méretűek, szálsíkjaikban két féle szálát alkalmazunk (lásd 2. ábra): 100 μm vastagságúak a térformáló szálak és 20 μm vastagságúak az anódszálak. A szálsíktól 1,5 mm-re elhelyezkedő alsó katódot a szálakkal egy síkban, merőlegesen, 4 mm × 320 mm felületű parkettákra (pad) szegmentáltuk. A térformáló szálakon a pozitív ionok mozgása következtében pozitív polaritású jelek alakulnak ki, majd ezen pozitív ionfelhő tükörtöltése megjelenik a parkettákon. Így a közelkatódos kamrák alkalmasak az egy időben történő, egymásra merőleges irányú digitális jelkiolvasásra a térformáló szálakon és a parkettákon is. Eredményül megkapjuk a kozmikus részecske beütésének „koordinátáit” az adott CCC kamrán.



2. ábra: A közelkatódos kamra belső szerkezete [9,10].

A detektor - az egyes szálak, ill. parketták - detektálási hatásfoka fontos paraméter a mérések ideje, ill. a detektor energiafelhasználása szempontjából: kisebb detektálási hatásfokkal több idő szükséges ugyanakkora statisztikai adatmennyiség összegyűjtésére, ami nagyobb energiafelhasználást jelent a detektor szempontjából. A CCC kamrák detektálási hatásfoka átlagosan jobb, mint 95 % (lásd 3. ábra), ami a laboratóriumi mérések során nem változott.



3. ábra: A REGARD műiontomográf közelkatódos kamráinak detektálási hatásfoka az érzékeny szálakra (piros vonalak) valamint a parkettákra (kék vonalak).

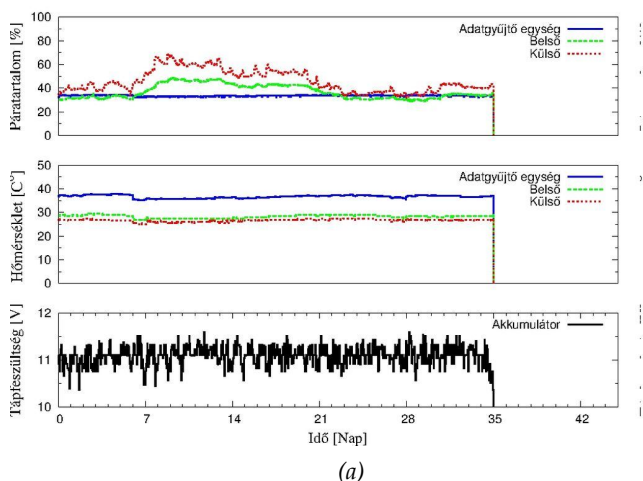
Kozmikus sugárzás elnyelődése vas és ólom abszorbensben

Korábbi méréseink [6,7,8] során világossá vált, hogy alkalmazásainkhoz szükséges a müonok különböző (sűrűségű) anyagokban történő elnyelődésének kellő ismerete. Méréseink célja az volt, hogy a müonszám megváltozását mérjük aránylag kis anyagvastagságok esetén, mert nem pontosan ismert a kisenergiás müonok eloszlása. Méréseinket az MTA Energiatudományi Kutatóintézetének Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratóriumában végeztük el a DÖME (DÖgnehez MérőEszköz, 8,5 tonna), valamint 1,2 tonna ólomtéglá segítségével. A 4. ábrán látható a müontomográf, valamint az abszorbensként szolgáló berendezés. A berendezés egy vas (Fe) és vékony ólom (Pb) rétegekből felépülő, 80 cm × 80 cm × 80 cm belső térfogatú, 15,6 cm falvastagságú kocka. Ennek belsejében helyeztünk még el további ólomrétegeket a méréseink során.

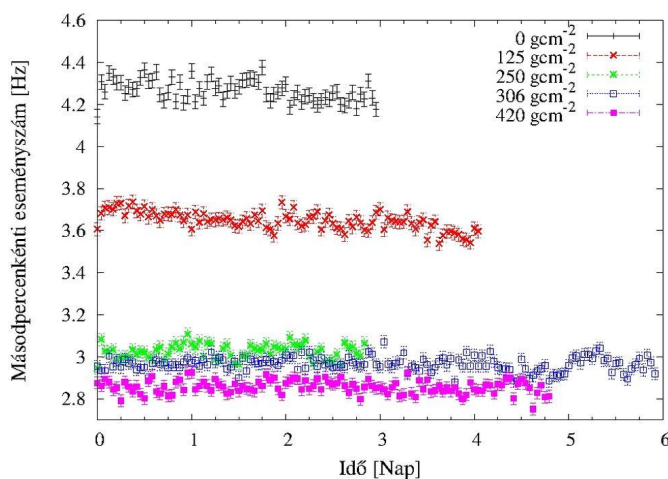


4. ábra: Referenciamérés müontomográfal a DÖME berendezés tetején.

A mintegy 5 hetes mérési időtartam során különböző abszorbens vastagságok esetén (berendezés felett, belsejében, ill. az alatt) végeztünk méréseket. Az 5. ábrán láthatók a 35 nap során a detektor szenzorai által rögzített környezeti változók (páratartalom, nyomás), valamint a detektor működését biztosító tápfeszültség és a detektált müonok frekvenciája a különböző vastagságú abszorbens rétegek alatt. Mérésünkben az abszorbens rétegvastagságát a sűrűségheossal jellemezzük, amely az abszorbens cm-ben kifejezett vastagságának és g/cm³ egységekben kifejezett sűrűségének a szorzata, azaz a teljes anyagmennyiség szokásos mérőszáma.



(a)

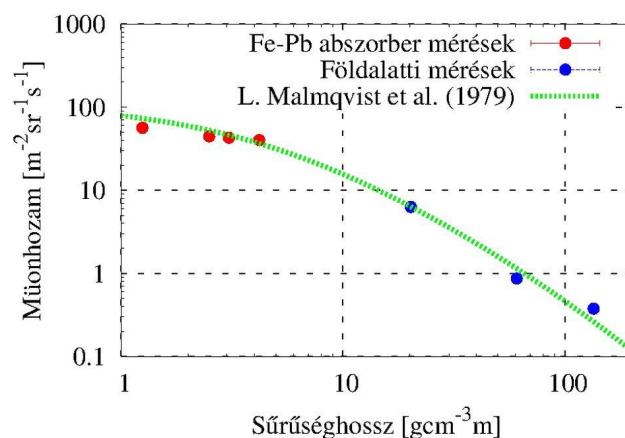


(b)

5. ábra: A müontomográfal mért környezeti változók (a ábra) és az események frekvenciája (b ábra) különböző vastagságú abszorbens rétegek esetén.

Méréseink fontosságát az adja, hogy a müonok elnyelődésének függvényében (pl. a müonhozam mélységfüggésének ismerete alapján) megbecsülhető, hogy mennyi idő szükséges a detektor feletti anyag feltételezett sűrűségeloszlásának pontos feltérképezéséhez, azaz mennyi kozmikus müon-eseményt kell detektálni a megfelelő pontosság eléréséhez. A sűrűségheossal mérések elemzésével pedig más anyagok esetében is megadható a mért müonhozam ismeretében a detektor feletti anyagréteg vastagsága. Ez utóbbit összevetve az ismert közetvastagsággal lehetőségünk nyílik sűrűség-inhomogenitások (pl. a közethez képest nagyobb sűrűségű ércek) vagy földalatti, rejtett üregek detektálására!

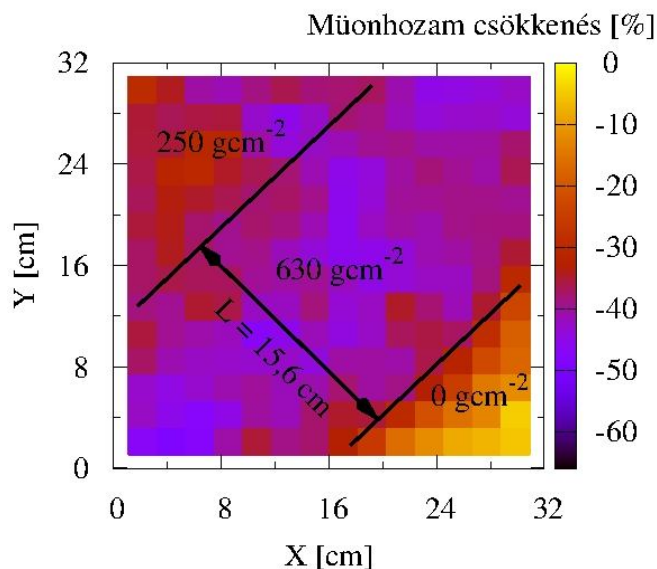
A 6. ábrán látható a müontomográfal mért függőleges müonhozam sűrűségheossal-függése az ólom és vas abszorbensben (piros pontok statisztikus hibákkal) és a korábbi, földalatti méréseink (kék pontok statisztikus hibákkal), amelyeket a KFKI Kampusz területén lévő Jánossy aknában [6] és a Pilisben található Ajándék-barlangban [7,8] mértünk. A 6. ábra alapján méréseink jó egyezést mutatnak a [11] szakirodalomban közölt adatokkal.



6. ábra: Merőleges müonhozam abszorber (piros pontok statisztikus hibákkal) és földalatti (kék pontok statisztikus hibákkal) mérések, amelyek jó egyezést mutatnak [11] szakirodalmi adatokkal.

További alkalmazási lehetőségek vizsgálata

Érdekes kérdés, hogy a detektor alkalmas-e nagy sűrűségű tárgyak leképezésére. Ennek demonstrálására, bizonyítására elvégeztük az abszorberként szolgáló DÖME berendezés (röviden berendezés) leképezését kozmikus müonokkal. A leképezés elkészítéséhez két mérést végeztünk: egy 2 napos mérést a berendezés felett – mint referencia-mérés –, majd egy további 4 napos mérést a berendezés alatt. A második mérés során a detektor a DÖME fala alatt volt elhelyezve, 45 fokkal elforgatva a berendezés falához képest. A leképezéshez az időegység alatt a detektor felületéhez képest merőlegesen (zenitben) érkező kozmikus müonok arányát számoltuk ki minden felületemre (pixelre), mind a berendezés alatti, mind pedig a felette történt mérésekre. Ezt követően felületemenként kiszámoltuk, hogy a detektorunk feletti berendezésben hány százalékot csökken a müonhozam. A 7. ábrán három jól elkülöníthető tartomány látszik: a berendezés teteje és alja (250 gcm^{-2}) okozta, átlagosan 30 %-os hozamcsökkenés; a berendezés fala (630 gcm^{-2}) okozta, átlagosan 50 %-os hozamcsökkenés és a berendezés alól kilógó (0 gcm^{-2}) detektorfelület által mért, átlagosan 0 %-os hozamcsökkenés.

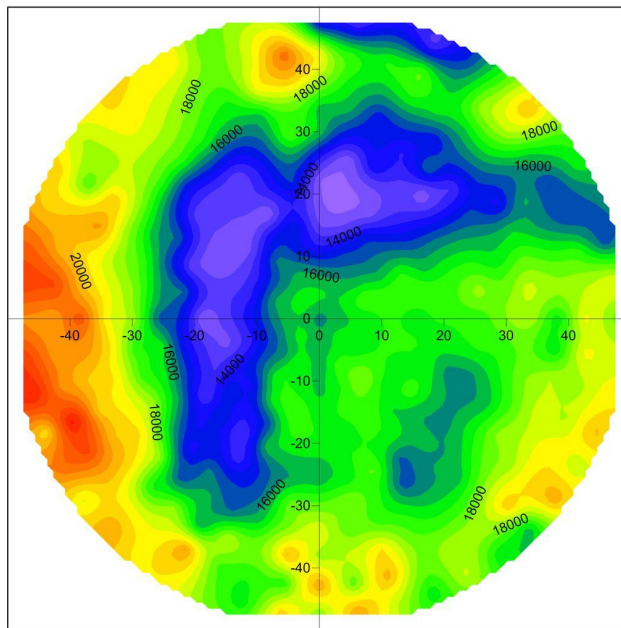


7. ábra: A berendezés 15,6 cm vastagságú falának leképezése a müontomográffal.

A 8. ábrán a kozmikus müonok 2 dimenziós zenit- és azimuttszög-eloszlását láthatjuk $\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}$ egységekben a DÖME berendezés alól mérve. Az origó a detektor középpontja, a

vízszintes és függőleges tengelyeken az x és y irányú zenit-szög-vetületek láthatók. Az eloszláson kékkkel színeztük az alacsonyabb, pirossal a magasabb hozamú térszögeket. A 8. ábrán a kék „L-alakú” tartomány mutatja a DÖME berendezés falait és a jobb oldali zárt ajtó által kikapart térszögeket. A müontomográf a DÖME alatt asszimmetrikusan, balra helyezkedett el. A mérés alatt a bal oldali ajtaja nyitva, a jobb oldali zárva volt. Ez utóbbi vetülete látszik az ábra jobb alsó ténnyedében.

Ezek az eredmények egyértelműen azt bizonyítják, hogy detektorunk alkalmazható nagy sűrűségű objektumok roncsolásmentes leképezésére – káros mesterséges besugárzás nélkül – a kozmikus müonok segítségével.



8. ábra: Kozmikus müonok zenit- és azimuttszög eloszlása a DÖME alatt elhelyezett detektor szemszögéből.

Összefoglalás

Bemutattuk a REGARD csoport által kifejlesztett, nagyenergiás kozmikus részecskék detektálására szolgáló detektort, amely a kozmikus müonok hozamát mérve – a geofizikai alkalmazások mellett – alkalmas nagy sűrűségű tárgyak leképezésre is. A közölt eredmények további érdekes alkalmazási lehetőségeket vetnek fel: stratégiai nukleáris anyagok azonosítása (csempészet), atomreaktorok fűtőelemeinek monitorozása valamint nehezen megközelíthető épületek, épületszerkezetek (pl. atomreaktor-szigetelő szarkofág) szerkezeti ellenőrzése.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásunkat az OTKA NK778816, NK106119, H07-C 74164, és K104260 pályázatok, valamint részben az OTKA-KTIA 77719, 77815, NIH TET 10-1 2011-0061, ZA-15/2009 és NAP VENEUS (OMFB-00184/2006) pályázatok támogatták. BGG és VD szerzők külön köszönetet mondanak az MTA Bolyai János tudományos kutatási ösztöndíjának.

Irodalomjegyzék

- [1] V.F. Hess: *Penetrating Radiation in Seven Free Ballon Flights*; PZ 13, 1912, 1084
- [2] L. W. Alvarez et al.: *Search for Hidden Chambers in the Pyramids*; Science 167, 1970, 832-839
- [3] K. Nagamine et al.: *Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction*; NIM A 356, 1995, 585-595
- [4] Caffau et al.: *Underground cosmic-ray measurement for morphological reconstruction of the "Grotta Gigante" natural cave*; NIMA 385 1997,480-488
- [5] K. N. Borozdin et al.: *Radiographic Imaging with Cosmic Ray Muons*; Nature 422, 2003, 277
- [6] Barnaföldi G. G. és mta.: *Kincskeresés kozmikus müonokkal-avagy kozmikus müondetektálás alkalmazott kutatásokban*; Fizikai Szemle, 2011,401-407
- [7] G. G. Barnaföldi et al.: *Portable Cosmic Muon Telescope for Environmental Applications*; NIM A 689, 2012, 60-69
- [8] L. Oláh et al.: *CCC-based Muon Telescope for Examination of Natural Caves*; Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss. 2, 2012, 781-800
- [9] D. Varga et al.: *Asymmetric Multi-Wire Proportional Chamber with reduced requirements to mechanical precision*; NIM A 648, 2011, 163-167
- [10] D. Varga et al.: *Close cathode chamber: Low material budget MWPC*; NIM A 698, 2013, 11-18
- [11] L. Malqvist et al.: *Theoretical Studies of In-situ Rock Density Determinations Using Underground Cosmic-ray Muon Intensity Measurements with Application in Mining Geophysics*; Geophysics 44, 1979, 1549-1569