



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Nukleáris Technikai Intézet

Részecskefizikai detektorok fejlesztése és alkalmazása müográfiára

PhD tézisfüzet

Nyitrai Gábor

Témavezető: Dr. Varga Dezső
Wigner Fizikai Kutatóközpont

Budapest
2023

Bevezetés

A müográfia egy gyorsan fejlődő képalkotó eljárás, amely a kozmikus sugárzásból keletkező müon részecskéket alkalmazza. Ezek a természetben előforduló nagy energiájú müonok akár több kilométer közeten is képesek áthatolni. A képalkotás alapja, hogy a sűrűbb anyag több müont nyel el, hasonlóan a csontokat átvilágító röntgensugárzáshoz. Első közelítésben a detektált müonfluxus (normalizált számlálási ráta) csak az érkező részecskék zenitszögétől és a müon útja mentén integrált anyagsűrűségtől (sűrűség-hossz) függ. A müonfluxus és a sűrűség-hossz közötti szigorúan monoton összefüggés az abszorpciós müográfia alapja, ami ezáltal hatékony eszköz a 10–1000 m-es közetrétegek átlagsűrűség-leképezésére. A müonpályákat a különböző irányokban a nagyenergiás fizikából ismert nyomkövető detektorokkal mérhetjük. A müográfia geometriai peremfeltétele, hogy a nyomkövető detektor tengerszint feletti magassága alacsonyabban kell legyen, mint a vizsgált objektum szintje: sem a horizont irányából, sem az alól nem jön müon. Ha azonban a geometriai feltétel teljesíthető, akkor a müográfia bizonyos esetekben jobb képfelbontást biztosít, mint más roncsolásmentes geofizikai technikák (mint például a gravimetria, szeizmika vagy a geoelektromos tomográfia). A módszer hasznosítása több tudományterületen is felmerül, beleértve a vulkanológiát, a bányászatot, a régészetet, vagy az épületmérnöki alkalmazásokat. A mérés eredménye olyan sűrűséganomáliák felderítése, mint az ismeretlen üregek, eróziós zónák, nagy sűrűségű ércetek vagy akár a dinamikus sűrűségváltozások. Egyes esetekben, ha több detektorpozícióból láthatunk rá a vizsgált térre, akár 3D sűrűségrekonstrukció is lehetséges.

A kutatási terület természeténél fogva interdiszciplináris, ami a fejlődés egyik fő kihívása volt az elmúlt évtizedekben. Méréstechnikai oldalról, különböző müon-nyomkövető detektor-technológiai irányok alakultak ki müográfiára a nagyenergiás részecskefizikai kísérletekből kiindulva, és mivel ezek jellemzően nagyon összetettek, a kísérleti csoportok egyértelműen egy vagy néhány technológiára fókuszálnak.

A Wigner Fizikai Kutatóközpontban az Innovatív Detektorfejlesztő “Lendület” Kutatócsoport, melynek tagja vagyok, gáztöltésű nyomkövetőkkel foglalkozik, ezen belül elsősorban az MWPC (Multi-Wire Proportional Chamber, sokszálas proporcionális kamra) gáztöltésű detektortípusok váltak be müográfiai célokra. Az MWPC-k robusztus, alacsony fogyasztású, költséghatékony eszközök, megfelelő nyomkövetési felbontással (10 mm alatt). A detektoroknak az alkalmazásokban a laboratóriumi körülményekhez képest extrém kihívásoknak kell megfelelniük, mivel a müografikus adatgyűjtés jellemzően hónapokig is tarthat, zord terepi körülmények között, minimális felügyelettel.

Kutatócsoportom részt vesz az egyik legkorszerűbb nyomkövető technológia, a mikrosztruktúrárt gázdetektor (MPGD) fejlesztésében is, mint például a GEM (Gas Electron Multiplier, gáz elektron sokszorozó), amely széleskörű népszerűségnek örvend a részecskefizikában. Az MPGD ígéretes választás lehet specifikus müográfiai alkalmazásokhoz is, különösen ha nagy felbontásra is szükség van, azonban detektorfizikai kihívások merülhetnek fel a jelerősítés homogenitása vagy a gyártási hibák tekintetében.

Doktori disszertációmban a Wigner Fizikai Kutatóközpont Detektorfizikai csoportjában a gáztöltésű detektorokon végzett kutatás-fejlesztéseimet, és a müográfias alkalmazásokra vonatkozó adatkiértékelési munkáimat mutatom be.

Célkitűzések

Doktori értekezésem motivációja, hogy bemutassam a gáztöltésű detektorokkal kapcsolatos fejlesztéseimet, amelyek a bevezetésben leírt technológiai követelmények teljesítését célozzák, továbbá a müográfias alkalmazásokkal és adatok kiértékelésével kapcsolatos kutatási eredményeimet szeretném bemutatni, amelyek végső soron a radiográfiai vagy tomográfias képalkotáshoz vezetnek.

Kitérek a MWPC-kre vonatkozó fejlesztéseimre a müográfiai szituációk széles skálájában való alkalmazhatóság érdekében (1. tézis), amely a következő követelményeket támasztja a detektorokkal szemben: hosszú távú stabilitás földalatti vagy felszíni méréseknél, környezeti paramétereknek való ellenállás (hőmérséklet-, nyomás- és páratartalom), mobilitás és szállítási igénybevételekkel szembeni robusztusság, a költséghatékonyság, biztonság és az autonóm működés.

Bemutatom az alacsony gázfogyasztás elérését célzó kutatásfejlesztési eredményeket a detektor karbantartásának jelentős csökkentése érdekében (2. tézis). A detektor autonómiája, és ezáltal a karbantartást csökkentő alacsony gázfogyasztás kulcsfontosságú bizonyos müográfiai alkalmazásokban, mivel a távoli adatgyűjtés hónapokig is eltarthat, így ha gyakori karbantartásra lenne szükség, akkor a müográfiai felmérés bizonyos esetekben kivitelezhetetlen lenne (általában amikor az infrastruktúra nem áll rendelkezésre). Céлом az volt, hogy megvizsgáljam, hogyan lehet az egyszerűség szem előtt tartásával a lehető legalacsonyabb gázáramlással működtetni a gáztöltésű detektorokat, ami még biztonságos detektor-teljesítményt eredményez.

A Detektorfizika csoport által kifejlesztett, és általam továbbfejlesztett “Leopard” fedőnevű GEM pásztázó rendszer célja az MPGD detektorok egyedien részletes diagnosztikai vizsgálata (3. tézis). Fejlesztéseim célja a pásztázás felbontásának növelése volt, így nem csak a vastag GEM-eket (300–400 μm lyukátmérő), hanem a szabványos GEM fóliákat (50–70 μm lyukátmérő) lehet letapogatni, továbbá nemcsak aranyozott felületek, hanem a szélesebb körben elterjedt rézbevonatos felületek is mérhetőek (amelyeknek alacsonyabb a kvantumhatásfoka, így kisebb fotoelektron-hozama). A detektorfizikai fejlesztések eredményeképpen a motivációm a GEM-ek erősítés-homogenitásának és a gyártási hibák hatásának vizsgálata volt a technológia optimalizációja és minőségellenőrzése érdekében.

A dolgozat záró fejezeteiben bemutatom a müografikus képalkotásra irányuló erőfeszítéseimet, amelyek a sűrűségeloszlások rekonstruálását célozzák (4. tézis): itt a müográfiai adatfeldolgozáson túl célkitűzésem volt egy tomográfiai inverziós módszer kidolgozása a sűrűséganomáliák térbeli elhelyezkedésének meghatározására, és a módszer alkalmazása egy kísérleti adatokon alapuló, összetett sűrűséganomália-rendszert tartalmazó föld alatti közetréteg három dimenziós szerkezetének meghatározása, azonosítva az ezt lehetővé tevő lényegi kísérleti feltételeket (mérések minősége, mennyisége, lokális geometria ismerete, illetve módszertani buktatók).

Vizsgálati módszerek

3D nyomtatott detektor komponenseket és kiegészítő műszereket (tartóállványok, nagy tartósságú és multifunkciós burkolatok, gyártóberendezések), konstrukciós eljárást, különböző kamraméreteket és detektormodul variációkat, valamint a modulok szögfelbontásának közvetlen mérését fejlesztettem ki a MWPC detektorokhoz.

Második tézisemből következik, hogy a detektor gázvonalának végére egy nem kipárolgó anyagú buffercső beépítésével, amely kellően nagy térfogatú és elég hosszú ahhoz, hogy korlátozza gázszennyező molekulák axiális diffúzióját, az MWPC detektorok egy nagyságrenddel kisebb gázbevitellel üzemeltethetők, mint amit korábban alkalmaztunk. Az általam részleteiben kidolgozott kutatási módszerek a következők voltak: detektorkamrák belső kipárolgásának mérése (jelerősítés csökkenése „zárt üzemmódban”), csövekben a szennyeződés diffúziójának becslése (radiális diffúzió), a szennyeződés terjedésének vizsgálata a gázrendszer nyitott végéből (axiális diffúzió), valamint a környezeti hőmérséklet vagy nyomás miatti munkagáz térfogat-összehúzódásának („légzési hatás”) mérése.

Megvizsgáltam a kifejlesztett MWPC detektorok stabilitását a fent említett kihívásokkal szemben (alacsony áramlású üzem hosszú távú kültéri tesztje, jelerősítés kalibrálása, kamra stressz tesztek). A vizsgálatokhoz a fejlesztéseken és adatanalízisen túl hozzájárultam a detektorok alkalmazásához terepi telepítésekkel és karbantartásokkal, például a japán Szakuradzima vulkánnál létrehozott MWPC-alapú müográf obszervatóriumánál, a magyarországi barlangi és Budai Várban folyó müográfiai kutatásoknál, az olaszországi Mussomeli kastély felmérésénél, és bányászati alkalmazásoknál Finnországban és Németországban.

A Leopard UV fényel pászttázó optikai rendszerét továbbfejlesztettem a GEM detektorok egyedülállóan részletes kutatásához és fejlesztéséhez. Terveztem állítható 3D nyomtatott optikai elemeket, finomhangoltam az optimális tárgy-képtávolságokat, aszférikus lencsét szereltem fel, kisebb túlyukakat és fókuszált vagy deutériumos UV-forrást alkalmaztam, valamint lefedtem azokat az alumínium elemeket, amelyek a visszaverődés miatt elmoshatják a képet. Bemutattam, hogy a Leopard rendszer képes szabványos GEM-eket $30\ \mu\text{m}$ felbontásban letapogatni, ami lehetővé teszi a lokális detektorfizikai jelenségek, például széleffektus vagy gyártási hibák hatásának vizsgálatát, így a rendszer hozzájárulhat a GEM technológia optimalizálásához.

Kifejlesztettem egy müográfiai adatfeldolgozó szoftvert, amely a topográfiai adatokból adott irányú közethosszakat generál, a várható sűrűség-hosszúságból számítja a müonfluxust, vagy a mért müonfluxusból számítja ki a sűrűséghosszt. Az esetleges szisztematikus bizonytalanságokat és a hibaterjedést is tartalmazza az algoritmus.

A müonfluxus adatokból térbeli sűrűség-rekonstrukciós módszereket vizsgáltam. Linearizált inverziós algoritmust adaptáltunk müográfiára, amely a súlyozott legkisebb négyzetek illesztésén és a legnagyobb valószínűség módszerén alapul, valamint a sűrűséget egy diszkrétizált térben geológiai releváns Bayes-alapú feltételek kombinációjával rekonstruálja a több nézőpontú müográfiai mérésekhez. A módszer magában foglalja a hibaterjedést, a fókuszterület meghatározásához szükséges kvantifikációkat, a stabilitás és konvergencia érdekében egy „2+1D” egyszerűsítést, valamint szintetikus adatokon való tesztet. A 3D sűrűségbecslést egy kis mélységű (40–60 m) karsztos földalatti repedészóna nagyfelbontású müográfiai vizsgálatán validáltam a magfúrési pozíciók és irányok javaslatával, a fúrési minták pedig igazolták a sűrűséganomáliák meglétét.

Tézispontok

1. MWPC detektorok tervezése és megépítése müográfiai célokra

Részt vettem az első korszerűsített MWPC prototípusok kifejlesztésében [1]. Ez alapján olyan földalatti detektorrendszereket fejlesztettem, melyek megfelelnek a hosszútávú autonóm müográfiai adatgyűjtés feltételeinek (hordozhatóság, nézetállítás, por- és cseppvédelem). Részt vettem ezen detektorok geofizikai alkalmazásaiban [9, 18-20], továbbá mérést fejlesztettem ki a detektor modulok szögfelbontásának közvetlen meghatározására.

Terepi alkalmazásokkal megmutattam, hogy az általam tervezett 3D nyomtatott belső elemekkel és konstrukciós eljárásokkal nagy felületű MWPC-alapú detektorok készíthetőek, melyekkel a detektorok hosszútávon laboron kívüli körülmények között is stabilan üzemképesek. A detektorok képesek ellenállni a nagy természetes napi hőingásnak ($\Delta 20$ °C) és gyors hőmérséklet-változásnak, a magas abszolút hőmérsékletnek (40 °C) és a nagy páratartalomnak (90% RH), valamint a szállításkor előforduló jelentős mechanikai igénybevételeknek [2, 5, 6, 15, 17]. A fejlesztések jelentősen hozzájárultak a detektor-kamrák nagy számban való alkalmazásához a Szakuradzima japán vulkán müográfiai obszervatóriumában [4-6, 10-13, 15, 16].

2. MWPC detektorok gázfogyasztásának csökkentése

Megmutattam, hogy a nyitott gázrendszerű detektorok terepi alkalmazásánál a gázfogyasztás minimalizálható (MWPC típusú detektor esetén akár 3 l/nap alá), ha a napi hőingásból származó levegő-visszaszívásnak megfelelő térfogatú, és a levegődifúzióknak ellenálló hosszúságú, nem kipárolgó anyagú buffercsövet alkalmazunk a gázrendszer végén [2, 8, 15, 17]. A difúzió tovább csökkenthető a buffercsőbe szerelt fojtásokkal [8].

3. Mikrostruktúrás detektorok nagy felbontású UV pásztázása

Megmutattam, hogy a Leopard detektorszkennerrel GEM mikrostruktúrás detektorok erősítés-homogenitása akár 30 μm felbontásban vizsgálható, amivel lokális detektorfizikai tulajdonságok is mérhetőek (pl. szél-effektus, gyártási hibák hatása) [7, 14]. Demonstráltam, hogy a Leopard képes a nagy méretű GEM-ek ipari minőségellenőrzésére [14]. Bemutattam a mikrostruktúrás detektorok alkalmazásának lehetőségeit illetve ennek korlátait a müográfiában.

4. Müográfiai adatfeldolgozás és sűrűség rekonstrukció

A müográfiai adatok kiértékeléséhez szükséges fluxus- és közetsűrűség-hossz-számítási és átváltási módszereket vizsgáltam és szoftvert írtam ezen számítások alkalmazására. Részt vettem a Budai hegységben található Királylaki-táróban végzett üregkutatói célú müográfiai felmérésben, és a nagy felbontású és több nézőpontú adatok feldolgozásával megmutattam, hogy sűrűséganomáliák térbeli elhelyezkedése meghatározható. Az előzetes számításaim alapján fúrási pontokat terveztem a validációhoz, és a fúrás validálta alacsony sűrűségű törmelékes zónák helyét a föld alatt. A müográfiai adatok alapján a térbeli sűrűségeloszlás meghatározását teszteltem Bayes-alapú tomográfiai inverziós módszerrel, és megmutattam, hogy 3D müográfiai sűrűséginverzió elvégezhető megfelelő linearizálások után 2+1 dimenzióban vonalmenti mérési pozíciók esetén, vagyis térbeli hálózás helyett a mérési pontok vonalát metsző síkokban elegendő két dimenziós inverziót végezni a stabilabb konvergencia érdekében [3, 18].

Az eredmények hasznosítása

Az MWPC detektorok első alkalmazása a japán Kjúsú szigetén lévő Szakuradzsimá vulkánnál volt, a Tokiói Egyetem, Wigner Fizikai Kutatóközpont és az NEC vállalat együttműködésében 2016-tól. A közös magyar-japán müográf obszervatórium (Sakurajima Muography Observatory, SMO) azóta is fejlődik, és az MWPC modulok száma 2022-ben elérte a 11-et (8,7 m² teljes érzékeny terület), amely a világ legnagyobb müográfiai monitorozó rendszerét és számos földtudományi leletet eredményezett eddigi. Vulkanológiai alkalmazása a detektoroknak az olaszországi Etnánál is tervben van.

A disszertáció Kitekintés (Outlook) című fejezetében bemutatok néhány folyamatban lévő vagy befejezett (megjelenésre váró) müográfiai kampányt, amelyek szintén támaszkodnak a téziseimre és az én közreműködéseimre. Ez magában foglalja a müográfiai képfelbontás számszerűsítését és bemutatását egyedi domborzati elrendezéssel (Tündér-szikla), valamint régészeti, építőmérnöki és bányászati alkalmazások bemutatását (budai és mussomeli vár, kemi és szászországi bánya).

Az MWPC modulok további alkalmazásai az „AGEMERA” és a „Mine.io” Horizon Europe projektekhez is folyamatban vannak.

Hivatkozások

A tézispontokhoz kapcsolódó, publikációs követelményekbe beszámítható tudományos közlemények

[1] D. Varga, G. Nyitrai, G. Hamar, and L. Oláh: “High Efficiency Gaseous Tracking Detector for Cosmic Muon Radiography” [Adv. High Energy Phys.](#) **2016**, 1962317 (2016).
Article, IF: 1.740 (K1)

[2] G. Nyitrai, G. Hamar, and D. Varga: “Towards low gas consumption of muographic tracking detectors in field applications” [J. Appl. Phys.](#) **129**, 244901 (2021).
Article, IF: 2.546 (K2)

[3] L. Balázs, G. Nyitrai, G. Surányi, G. Hamar, G. G. Barnaföldi, D. Varga: “3D Muographic Inversion in the Exploration of Cavities and Low-density Fractured Zones” [Geophys. J. Int.](#) (accepted) (2023).
Article, IF: 3.352 (K2)

További tudományos (társszerzős) közlemények

Impakt faktoros publikációk

[4] L. Oláh, Sz. J. Balogh, Á. L. Gera, G. Hamar, G. Nyitrai, H. K. M. Tanaka, and D. Varga: “MWPC-based Muographic Observation System for remote monitoring of active volcanoes” *Nucl. Instrum. Meth. A* **936**, 57-58 (2019).

Proceedings, IF: 1.433

[5] D. Varga, G. Nyitrai, G. Hamar, G. Galgóczi, L. Oláh, H. K. M. Tanaka, and T. Ohminato: “Detector developments for high performance Muography applications” *Nucl. Instrum. Meth. A* **958**, 162236 (2020).

Proceedings, IF: 1.433

[6] D. Varga, G. Hamar, G. Nyitrai, Á. Gera, L. Oláh, and H. K. M. Tanaka: “Tracking detector for high performance cosmic muon imaging” *J. Instrum.* **15**, C05007 (2020).

Proceedings, IF: 1.366

[7] G. Nyitrai, G. Hamar, G. Galgóczi, and D. Varga: “MPGD hole-by-hole gain scanning by UV excited single photoelectron detection” *Nucl. Instrum. Meth. A* **958**, 162726 (2020).

Proceedings, IF: 1.433

[8] G. Nyitrai, G. Hamar, D. Varga: “Low gas consumption in tracking detectors for outdoor applications” *J. Phys.: Conf. Ser.* **2374** 012181 (2022).

Proceedings, IF: 0.55

[9] G. Hamar, G. Surányi, D. Varga, G. Nyitrai, L. Oláh, Á. Gera, Sz. J. Balogh and G. G. Barnaföldi: “Underground muography with portable gaseous detectors” *J. Phys.: Conf. Ser.* **2374** 012186 (2022).

Proceedings, IF: 0.482

[10] G. Hamar, H. K. M. Tanaka, L. Oláh, D. Varga, G. Nyitrai, Sz. J. Balogh, Á. Gera: “Gaseous tracking detectors at the Sakurajima Muography Observatory” *J. Phys.: Conf. Ser.* **2374** 012188 (2022)

Proceedings, IF: 0.482

[11] L. Oláh, G. Gallo, G. Hamar, O. Kamoshida, G. Leone, E. Llewellyn, D. Lo Presti, G. Nyitrai, T. Ohminato, Sh. Ohno, H. K. M. Tanaka, D. Varga: “Muon Imaging of Volcanic Conduit Explains Link between Eruption Frequency and Ground Deformation” *Geophys. Res. Lett.* **50**(2), e2022GL101170 (2023)

Article, IF: 5.576

Impakt faktor nélküli publikációk

[12] L. Oláh, Sz. J. Balogh, G. Hamar, D. Varga, Á. L. Gera, G. Nyitrai, P.Zs. Pázmándi, G. Surányi: “Képkötés kozmikus részecskék nyomkövetésével” (Hungarian) [Fizikai Szemle](#) **2017/3** 75-76 (2017) Informative Article.

[13] L. Oláh, Sz. J. Balogh, Á. L. Gera, G. Hamar, G. Nyitrai, H. K. M. Tanaka, D. Varga: “Muography with Multi-Wire-Proportional-Chamber-based Tracking Detectors” [Journal of the Japan Society of Photographic Science](#) **81(3)**, 269-274 (2018) Informative Article.

[14] G. Nyitrai, G. Hamar, D. Varga: “MPGD gain map hole-by-hole” [AIDA-2020-D13.8 Deliverable Report](#) (2019) H-2020 Report.

[15] D. Varga, Sz. J. Balogh, Á. Gera, G. Hamar, G. Nyitrai, G. Surányi: “Construction and Readout Systems for Gaseous Muography Detectors” [Journal of Advanced Instrumentation in Science](#) **2022**, Jun. (2022) Proceedings.

[16] L. Oláh, H. K. M. Tanaka, T. Ohminato, G. Nyitrai, G. Hamar, D. Varga: “Muography of the Active Sakurajima Volcano: Recent Results and Future Perspectives of Hazard Assessment”, [Journal of Advanced Instrumentation in Science](#) **2022**, May (2022) Proceedings.

[17] Á. Gera, G. Nyitrai, G. Surányi, G. Hamar, D. Varga: “Gaseous detectors for field applications: Quality control, thermal and mechanical stability” [Instruments](#) **2022**, 6(4), 74 (2022) Article.

[18] G. Surányi, G. Hamar, D. Varga, Sz.J. Balogh, G. Nyitrai, G. Molnár, Á. L. Gera, G. Galgóczi, and G. G. Barnaföldi: “Cavity Location by Muon Tomography” [18th Proceedings Of The International Congress Of Speleology \(ICS\) – France, Karst: Heritage & Ressources](#) **6**, 120-123 (2022) Proceedings.

[19] G. Hamar, G. Surányi, D. Varga, Sz.J. Balogh, G. Nyitrai, G. Molnár, Á. L. Gera, G. Galgóczi, and G. G. Barnaföldi: “Multi-Wire Detectors for Underground Muography” [18th Proceedings Of The International Congress Of Speleology \(ICS\) – France: Karst: Heritage & Ressources](#) **6**, 124-126 (2022) Proceedings.

[20] L. Oláh, L. Balázs, G. G. Barnaföldi, G. Galgóczi, Á. L. Gera, G. Hamar, G. Nyitrai, G. Surányi, H. K. M. Tanaka, D. Varga: “Földtudományi kutatások és geotechnikai alkalmazások kozmikus müonok mérésével” (Hungarian) [MAGYAR GEOFIZIKA](#) **63**, 2022(4), 225–241 (2023) Informative Article.