

LÉGKÖRI MÜOGRÁFIA

Toronyi András^{1,2,@}, Oláh László², Varga Dezső²

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, TTK Fizikai és Csillagászati Intézet, Budapest; ²HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

@E-mail: toronyi.andras@wigner.hun-ren.hu

Bevezetés

A világűrből érkező, főként protonokból és könnyebb atommagokból álló kozmikus sugárzás a Földet elérve a felső légkör molekuláival kölcsönhatásba lép, ezzel a felszín felé haladó részecskezápороkat kelt, amelyeknek fontos összetevői a kozmikus müonok.

Ezen – az elektron nagy testvéreként¹ is emlegetett – elemi részecskék közel fénysebességgel mozogva, a relati-

visztikus idődilatació miatt elérik a földfelszínt, ahol több kilométer mélységbe is behatolnak. Anyagon történő áthaladáskor hozamuk csökken a közeg áthatolásához kellő energiával nem rendelkező részecskék elnyelődése miatt. A müonhozam mérésén alapszik a müonképalkotási eljárás, a *müográfia*, amely elvét tekintve a röntgenes képalkotáshoz hasonló: a leképezni kívánt geofizikai objektumot a kozmikus müonok „átvilágítják”, ezt kihasználva információt nyerhetünk annak anyageloszlásáról [1]. A müografiát már sikeresen alkalmazták vulkánok monitorozására, a bányászatban, illetve a barlangi és régészeti kutatásokban.

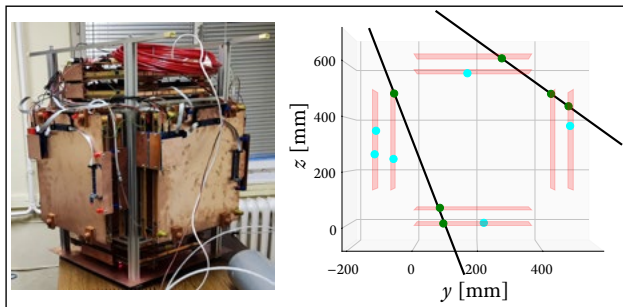
¹ A müonok töltésükben és spinjükben az elektronhoz hasonló részecskék, azonban tömegüket tekintve durván kétszázszor nehezebbek.

2022-ben *Tanaka Hiroyuki* és munkatársai – köztük több hazai kutató – megmutatták, hogy a müögrafiának légkörtani alkalmazásai is lehetnek. Müögrafiával képet alkottak egy trópusi ciklonról, és követték annak mozgását a *Kagoshima-öblön* keresztül, Japánban [2].

A légköri müögráfia olyan berendezést igényel, amely a lehető legtöbb irányból képes a müonhozam mérésére. Kutatómunkánk célja egy ilyen berendezés fejlesztése volt. A detektort a HUN-REN Wigner FK Innovatív Detektorfejlesztő „Lendület” Kutatócsoport megépítette. Kutatásomban a berendezés által felvett adatokat elemző szoftver fejlesztésével foglalkoztam, amelyben a kísérleti részecskefizikában alkalmazott eljárásokat implementáltam: részecskepálya-rekonstrukciót, részecskepálya-alapú geometriai finomhangolást, hatásfokszámítást és a részecskepályák irány szerinti eloszlásának számítását.

A detektor felépítése

A légkör-müögrafiás detektorrendszer sokszálas proporcionális kamrákból épül fel. Ezek gáztöltésű kamrák, amelyekben a gázteret párhuzamos réz katódlapok veszik körbe, és a gáztérben egymással párhuzamos nagy feszültségre kapcsolt anódszálak vannak kivesztve [3]. A kamrán áthaladó müonok ionizálják a gázt, és az így keletkező elektromos jel az anódszálokon érzékelhető. Az alapján, hogy a kamrában mely szálon vagy szálokon kaptunk jelet, információt nyerünk a részecske áthaladásának helyéről. A kamrákban két szálsík van kivesztve, amelyekben a szálok egymásra merőlegesek, így minden kamrában két dimenzióban kapunk információt az áthaladó müon pozíciójáról.



1. ábra. Balra a sokszálas proporcionális kamrákból felépülő légköri müögrafiás detektor. Jobbra a részecskepálya-rekonstrukció szemléltetése. A piros síkok a kamrák síkjai. A kék, illetve zöld pontok a hamis (elektromos zaj), illetve valódi (részecskék által hagyott) beütési pontok. A fekete egyenesek az illesztett részecskepályák

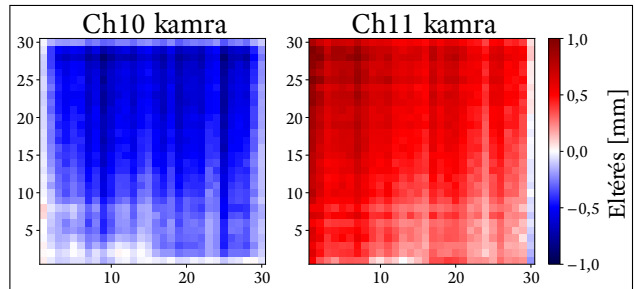


Toronyi András az ELTE TTK fizikus mesterképzésének hallgatója. A fizika alapszakot 2025-ben végezte el szintén az ELTE-n. 2023 és 2025 között a HUN-REN Wigner FK Innovatív Detektorfejlesztő „Lendület” Kutatócsoport és a Nagyenergiás Geofizika Kutatócsoport vezetésével végzett TDK-munkát a légköri müögráfia témakörében. Jelenleg a müometrikus pozicionáló rendszer fejlesztésével foglalkozik az említett kutatócsoportnál.

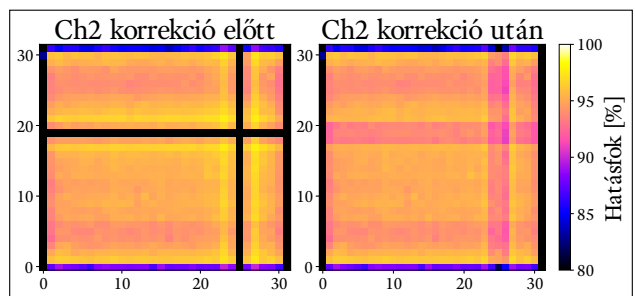
A detektorrendszer elrendezése (1. ábra) olyan, hogy a tér bármely irányából érkező részecske 3 vagy 4 kamrán áthaladhat, és az így kapott 3 vagy 4 beütési pontból a pályája rekonstruálható.

A szoftver működése

A detektorhoz fejlesztett szoftver lelke a részecskepálya-rekonstrukció. A részecskepályát a detektorban hagyott



2. ábra. Az ábrák a detektor két alsó kamráját mutatják. A pixelek színe a beütési pontok áthaladó részecskepályáktól való távolságát illusztrálja (jobb oldali skála) az ábrán vízszintes irányban. Látható, hogy a két kamra egymáshoz képest el van tolva, hiszen az egyik pozitív, míg a másik negatív irányban tér el a várt zérus átlagtól



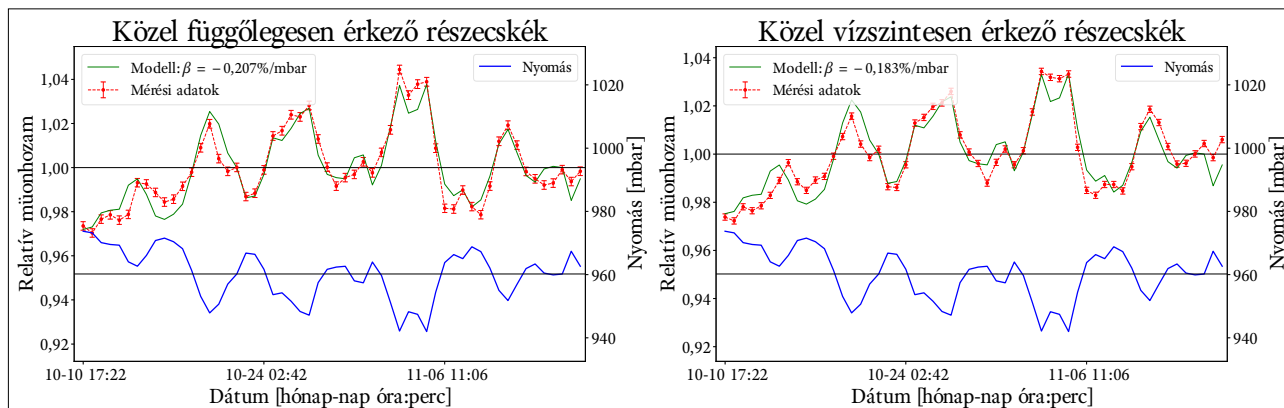
3. ábra. A 2-es számú kamra hatásfoka a hely függvényében. Bal oldalon látható két alacsony hatásfokú anódszál, amelyekre korrigálva a jobb oldali hatásfokot kapjuk. A kamra elég magas, 95% feletti hatásfokon üzemel



Oláh László fizikus, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. A Nagyenergiás Geofizika Kutatócsoport (<https://wigner.hu/s/high-energy-geophysics/>) alapítója. A müögráfia földtudományi és ipari alkalmazásainak kutatás-fejlesztésén dolgozik a HUN-REN Hazahívó és Külföldi Kutatókat Toborzó Program támogatásával.



Varga Dezső fizikus, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont főmunkatársa, az Innovatív Detektorfejlesztő „Lendület” Kutatócsoport vezetője. Szakterülete a kísérleti részecskefizika, ezen belül is elsősorban a hadronok kölcsönhatásainak vizsgálata, valamint gáztöltésű nyomkövetők fejlesztése alapkutatáshoz és alkalmazásokhoz.



4. ábra. A müonhozam légköri nyomástól való függésének mérése, közel függőlegesen és közel vízszintesen érkező részecskék esetén. A kék vonal a detektor helyén mért légköri nyomást mutatja. A piros pontok a müonhozam relatív változását jelölik a teljes mérési időtartamra vett átlaghoz képest. A zöld vonal a mérési eredményekre illesztett elméleti modell által a légköri nyomásból jósolt relatív müonhozam ingadozást mutatja. Az elméleti modell jól leírja a mérési eredményeket. A modell egyetlen paramétere a β barometrikus koefficiens, amely a nyomásfüggés erősségét jellemzi

beütési pontokra legjobban illeszkedő egyenes adja. A részecskék beütési pontjain túl megjelennek az elektromos zajból származó hamis beütési pontok is, amelyeket ki kell szűrni.

A részecskepálya-rekonstrukciót egy kombinatorikus algoritmus végzi: a valódi és hamis beütési pontok közül minden lehetséges módon kiválasztott három pontra egyenest illesztünk. Ezek közül azt fogadjuk el részecskepályaként, amelyik a legjobban illeszkedik (1. ábra). Ezzel kiszűrtük a zajt, hiszen a hamis pontokra az illeszkedés gyenge.

Az illesztett részecskepályák alapján érdekes korrekciós lehetőség adódik. Azt várnánk, hogy a beütési pontok illesztett részecskepályától való eltérései átlagosan nullát adnak, hiszen egy véletlen beütési pont minden irányban egyforma valószínűséggel tér el a részecskepályától. Ha ettől eltérést tapasztalunk, az a detektorgeometria tökéletlen ismeretét jelenti.

Az egyes kamrákban a hely függvényében vizsgálható, hogy a beütési pontok átlagosan mennyire és milyen irányban térnek el az áthaladó részecskepályáktól (2. ábra). Ezek alapján meghatározható a szoftvernek megadott és a valós detektorgeometria közti különbség, így javítható a programnak megadott elrendezés és ezzel az adatok kiértékelése.

Az illesztett részecskepályák alapján kiszámítható a detektor kamráinak *hatásfoka* is. Ez annak a valószínűségét jelenti, hogy a kamrán áthaladó részecske beütési pontot hagy a kamrában az áthaladási ponthoz kéllően közel. Sőt, a kamra különböző pontjain áthaladó részecskepályák vizsgálatával a hatásfok kamrán belüli helyfüggése is meghatározható. A hatásfok helyfüggésének ismerete például a rossz hatásfokú anódszálak felderítésére is lehetőséget ad, amelyekre a beütési pontok meghatározásakor korrigálni lehet (3. ábra).

Mérési eredmények

A korrekciók elvégzése után kiértékelhető a teljes mérés, és vizsgálható a részecskepályák irány szerinti el-

oszlása, valamint ezen keresztül a müonhozam légköri nyomástól való függése. Kihasnálva a detektor által lefedett térszöget, külön vizsgáltam a közel függőlegesen és közel vízszintesen érkező részecskék hozamát. A kapott eredményeket a 4. ábra foglalja össze.

A mérési eredményre jól illeszkedő elméleti modellt illesztettem mindkét tartományra; ennek egyetlen paramétere – a *barometrikus koefficiens* – a müonhozam nyomásfüggésének erősségét írja le. Az elméleti várakozásokkal egyezően, a közel vízszintesen érkező részecskék nyomásfüggése gyengébb, mivel azok átlagosan nagyobb energiájúak.

Összefoglalás és kitekintés

Az ismertetett berendezéssel mért adatok elemzésével bemutattuk a detektor légkörtani alkalmazhatóságát. A berendezést a jövőben nagyobb ciklonok és más légkörfizikai jelenségek (pl. hirtelen bekövetkező légköri hőmérséklet-növekedések) mérésére tervezzük alkalmazni.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24 kódszámú Egyetemi Kiválósági Ösztöndíj Programjának (NKFIA), a HUN-REN KSZF-144/2023 azonosítószámú „Hazahívó” Programjának, és az NKFIH TKP2021-NKTA-10 azonosítójú tématerületi kiválósági pályázatának támogatásával készült el.

Irodalom

- Oláh L. és mtsai (2017): Képkalkotás kozmikus részecskék nyomkövetésével. *Fizikai Szemle*, 2017(3), 74–78.
- Tanaka H. K. M. et al. (2022): Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones. *Scientific Reports*, 12(1), Art. No. 16710. 2045–2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20039-4>
- Varga D., Nyitrai G., Hamar G., Oláh L. (2016): High efficiency gaseous tracking detector for cosmic muon radiography. *Advances in High Energy Physics*, 2016(1), 1962317. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2016/1962317>