Müográfiai Képalkotás Hátterének Vizsgálata

SZAKGOLDOZAT

Fizika BSc. III

Szerző: Rábóczki Bence

Témavezető:

Dr. Hamar Gergő Wigner Fizikai Kutatóközpont Nagyenergiás Fizikai Osztály

Belső konzulens:

Dr. Surányi Gergely Eötvös Loránd Tudományegyetem Geofizikai és Űrtudományi Tanszék







Eötvös Loránd Tudományegyetem Budapest, 2022.06.04.

Kivonat

A müográfia egy fejlődő kutatási terület, mely nagyenergiás kozmikus müonokat használ képalkotásra és nagy kiterjedésű objektumok (például vulkánok, piramisok) sűrűségének meghatározására.

A Wigner FK REGARD kutatócsoportja számos nemzetközi müografikus projektben vesz részt saját fejlesztésű detektorrendszereivel. A csoport munkájába bekapcsolódva olaszországi és finnországi mérési adatokon dolgozva vizsgáltam a képalkotásnál megjelenő fizikai háttérből eredő zaj mértékét és forrásait. Az azonosításuk után különböző megközelítésű módszereket alkalmaztam, hogy növeljem a képalkotás minőségét. Munkám során megállapítottam, hogy a háttér mértéke nem elhanyagolható, és ezért indokolt speciális detektorrendszerek használata bizonyos típusú terepi méréseknél.

Az 1. részben ismertetem a müográfiai mérések fizikai hátterét, valamint múltbeli és jelenkori alkalmazásait, a 2. részben bemutatom a projekt során használt detektorrendszert és végül a 3. részben ismertetem a számításaimat és azok eredményeit.

Tartalomjegyzék

1.	Bev	ezetés	3
	1.1.	A kozmikus háttérsugárzás	3
	1.2.	A müográfia feljődése	5
	1.3.	Müografikus kutatási területek	7
	1.4.	A müografikus képalkotás alapjai	9
	1.5.	A müografikus képalkotás háttere	11
2.	ΑN	Iount Etna detektorrendszer bemutatása	12
	2.1.	Működési elve	12
	2.2.	Felépítése	13
	2.3.	Adatstruktúra	17
3.	Ere	dmények	18
	3.1.	A képalkotás optimalizálásának célja	18
	3.2.	Fizikai és kombinatorikai háttér	18
		3.2.1. Alacsony energiájú kozmikus részecskék	18
		3.2.2. Elektronikai zaj hatása	19
		3.2.3. Radioaktív sugárzás hatása	19
		3.2.4. Másodlagos részecskék hatása	21
	3.3.	Kisenergiás háttér szűrése	22
		3.3.1. Megfelelő események kiválogatása	22
		3.3.2. Khí négyzet próba	23
		3.3.3. Kettős egyenes illesztése	24
	3.4.	Háttérelnyomás terepi adatokon	25
		3.4.1. Mérési elrendezés Mussomeliben	25
		3.4.2. Khí négyzet értékek és meredekség-különbségek összevetése .	27
		3.4.3. Az új háttérszűrés hatékonysága	29
4.	Öss	zefoglalás és kitekintés	32

1. Bevezetés

A geofizika hagyományos módszereit azzal a céllal dolgozták ki, hogy a bolygónk felszíne alatti kőzetrétegeket feltérképezzék. Habár a szeizmológia segítségével a Föld legbelső részeiről is információkat szerezhetünk, és az ionoszférikus sugárzást kiaknázó magnetotellurikával akár több tíz kilométeres mélység is szondázható, azonban ezen módszerek nem alkalmasak olyan kifinomult kutatásokra, mint a müográfia. Egyes kutatási területeken akár kilométeres vastagságú céltárgyak átvilágítására is szükség lehet, az ilyen fókuszált vizsgálati módszerekből (például Röntgen) viszont a müográfia előtt nem állt rendelkezésre olyan, amely alkalmazható lett volna ekkora méretű testekre.

1.1. A kozmikus háttérsugárzás

A 20. század korai elméletei a Földön mérhető radioaktív háttérsugárzást csaknem kizárólag a földkéregből származtatták. Ezek a nézetek megdőlni látszottak, amikor Theodor Wulf a párizsi Eiffel-torony tetején mérte az elektromágneses sugárzás intenzitását saját tervezésű műszereivel, és megállapította, hogy az a vártnál kevésbé csökken a magassággal [1]. A kor kutatói ezért a hőlégballonos mérések felé fordították a figyelmüket, és Viktor F. Hess 1913-ban nagy magasságokban is sikeresen mérte ki a háttérsugárzást elektroszkópok kisülésének sebességét vizsgálva. A kísérlet során arra jutott, hogy a tengerszint feletti 3600 méteres magasságban már nagyobb a sugárzási érték mutatható ki, mint a felszínen [2]. Ebből arra következtettek, hogy létezik Földön túli eredetű, kozmikus, sugárzás.



1. ábra. A kozmikus sugárzás részecskéinek energia szerinti eloszlása [3]

A természetben detektált műonok forrása a nagyenergiájú (lásd 1. ábra) kozmikus háttérsugárzás, melynek legnagyobb része α -részecskékből és protonokból tevődik ki, forrásuk pedig lehet a Tejútrendszer vagy az extragalaktikus tér. Ezek az ionizáló részecskék jelentik az elsődleges kozmikus sugárzást . 1938-ban Pierre Auger állapította meg, hogy ezek a nagy energiájú részecskék ütközve a légkört alkotó elemekkel (főként a domináns nitrogénnel és oxigénnel) láncreakciót indítanak el, amelyeket kozmikus zápornak hívunk (lásd 2. ábra). Ebben a záporban keletkezik a másodlagos kozmikus sugárzás. Ennek a részei a műonok, melyeket 1937-ben Anderson és Neddermayer fedezett fel[4], és pionok bomlásával keletkeznek az alábbi módon [5]:

$$\pi^{+} \longrightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$

$$\pi^{-} \longrightarrow \mu^{-} + \bar{\nu_{\mu}}$$
(1)

Töltésük és spinjük az elektronéval egyezik meg, azonban tömegük kb. 200szorosa annak. Élettartamuk 2.2 μ s és közel fénysebességgel haladnak, így relativisztikus körülmények között képesek elérni a felszínt és alá is behatolni. Egységnyi sűrűségi anyagon áthaladva ionizációval 2 MeV/cm energiát veszítenek, és mivel széles energiaspektrumon detektálhatók [6], így alkalmasak képalkotásra. Egy hegyet véve példának, a kisebb energiájú müonok elnyelődnek az első 10-100 méteren, míg a nagyobb energiájúak képesek áthaladni rajta. Ez alapján a detektorral kellően nagy idő alatt megfigyelt müonfluxus-különbség sűrűség-inhomogenitást jelent a céltárgyban.



2. ábra. Kozmikus zápor a légkörben [7]

1.2. A müográfia feljődése

A müográfia módszere a múlt század második felében alakult ki. 1955-ben Ausztráliában E. P. George volt az első, aki kozmikus részecskék fluxusát használta képalkotásra [8], a kísérlet a 3 ábrán látható. Ez után azonban még tíz évet kellett várni az első komoly áttörésre ezen az új tudományterületen.



Geiger counter telescope used for mass determination at Guthega project of Snowy Scheme . . . Equipment described

By Dr. E. P. George[÷] University of Sydney, N.S.W.

3. ábra. Az első müografikus kísérlet címlapja a Commonwealth Engineerben [9]

1965-ben merült fel az ötlet, hogy a második gízai piramisban üregvizsgálatra is alkalmazható lenne a kozmikus sugárzás. Mivel a többi gízai piramisban kettőnél több feltárt kamra volt, ezért logikus feltételezés volt, hogy ebben is új üregeket fedezhetnek fel ezzel az új, roncsolásmentes módszerrel (korábban például puskaporos robbantásokkal próbáltak új járatokat keresni, ezzel megrongálva a több, mint 3000 éves építményt). Louis W. Alvarez fizikusokból és régészekből álló csapata megvizsgálta a lehetőségeket és a piramis két ismert kamrájából a Belzonikamrába telepítették a detektoraikat, mivel az a piramis alatt középen helyezkedik el, így innen az teljes szerkezetet jól szondázhatták. Hosszas elméleti és technikai előkészületek után 1968-ban kezdte meg a működést tizennégy szcintillátoros és négy szikrakamrás müográf. Az adatok kiértékelésében korai számítógépek segítették a kutatókat, akik hónapokig gyűjtötték a kiértékelésre alkalmas müonokat. Végül arra a megállapításra jutottak, hogy Hafré fáraó piramisában biztosan nem találhatók olyan üregek, melyek elérnék egy esetleges újabb kamra méretét[10]. A kétezres évek elején Japánban Hiroyuki Tanaka vezetésével több projekt is foglalkozott egy újfajta alkalmazási mód kifejlesztésével és a módszer pontosításával. 2005-ben az Iwate-hegy közelébe telepített detektorrendszerrel határozták meg a hegy átlagsűrűségét közel horizontálisan beérekző müonokat felhasználva. Adott pontokban a gravitmetrikus adatokkal összevetve arra jutottak, hogy a kétfajta mérési eredmény egymás hibahatárain belül esik, így sikerült klasszikus módszerrel alátámasztani a müográfia alkalmasságát nagyméretű céltárgyak sűrűségének pontos meghatározására.[11]



4. ábra. A gravimetrikus és a müografikus módszerekkel mért sűrűségek összevetése [11]

Ezek az eredmények utat nyitottak a vulkánkutatás felé, mivel bebizonyosodott, hogy nem szükségszerű közvetlenül a vizsgált objektum alá telepíteni detektorokat. A Wigner F. K. Nagyenergiás Fizikai Osztálya alá tartozó Innovatív Detektorfejlesztő "Lendület" Kutatócsoport (REGARD) a 2010-es évek elején kapcsolódott be a technológia aktív fejlesztésébe mind műszaki, mind elméleti téren. A Tokiói Egyetem Földrengéskutatási Intézetével együttműködve részt vesz a Sakurajima vulkán jelenleg is tartó monitorozásában, melynek célja a magmaáramlás nyomonkövetése, melyből egy esetleges közelgő kitörésre is következtetni lehetne. A csoport ezen kívül számos egyéb irányú kutatást végez, melyek célja újabb gyakorlatban is alkalmazható - kozmikus müonokon alapuló - technológiák létrehozása.

1.3. Müografikus kutatási területek

Napjainkban számos különböző alkalmazási területe van a müográfiának. Altalában ezek különféle geofizikai kutatások (például vulkán- vagy barlangkutatás), azonban az ipar, a régészet és a nemzetbiztonság is felhasználhatja a kozmikus sugárzáson alapuló vizsgálati módszereket.

Felszíni müográfia

A felszíni müográfia része például korábban tárgyalt vulkánkutatás és hegyek sűrűségvizsgálata. Jelenleg is futó projekt például a 2016-ban indult MEV (Mougraphy of Etna Volcano), melynek célja az Etna vulkán vizsgálata [12]. A munkába bekapcsolódott a REGARD csoport is, az Mt. Etna detektorrendszer valószínűleg 2022 második felében kezdheti meg a működését a vulkánnál, addig a Castello di Mussomeli várnál végez tesztméréseket (melyekkel én is foglalkoztam a dolgozatomban). Szintén a kutatócsoport közreműködésével folyik az SMO (Sakurajima Muography Observatory) projekt, melynek célja a Sakurajima vulkán müográfiai monitorozása [13]. A piramiskutatások is folytatódtak, például az elmúlt pár évben is sikerült új üreget kimutatni Kheposz fáraó gízai piramisában [14].

Felszín alatti müográfia

A módszer első alkalmazásai mind felszín alatt történtek. A klasszikus megközelítés szerint a vizsgált terület alá telepített detektorokkal figyelik a keresztülhaladó müonok intenzitásának csökkenését. Ezeket a müon-detektorokat gyakran barlangokban, bányákban vagy alagutakban helyezik el, ezért a REGARD csoport olyan müográfokat fejlesztett, amelyek praktikusan használhatók zord természeti körülmények között is [15]. Kevés áramot fogyasztanak, így akkumlátorról is üzemeltethetők hosszú időtartamokig és csak néhány hetente szükséges egy szakembernek ellátogatni hozzá műszaki ellenőrzésre és adat letöltésre. Az egyes járatokba helyezett több detektor több szögből is képes megfigyelni a felettük található rétegeket, így a sűrűségtérképekből kijelölhető az anomáliák térbeli helye (ezt nevezzük müon-tomográfiának). Ezt a módszert barlangok vagy nagy kiterjedésű építmények (például a korábban bemutatott piramis) feltérképezésére is alkalmazhatják, de az iparban is hasznosnak bizonyulhat. A finnországi Kemiben található krómbányában a REGARD csoport detektorai jelenleg is működnek és eredményesen kutatják az érctesteket.

A csoport - jelenleg prototípus stádiumban lévő - saját fejlesztése a mélyfúrási geofizika eszköztárát hivatott tovább bővíteni. A kutatók az ELTE geofizikusaival együttműködve egy olyan müográfot építettek (lásd 5. ábra), melyet lehetséges lesz mélyfúrási szondaként alkalmazni és nagy mélységekbe juttatni olyan területeken, ahol nem áll rendelkezésre barlang vagy alagút. Így a felszín alatti müográfia bárhol alkalmazhatóvá válhat a jövőben.



5. ábra. A fúrólyukakba tervezett müográf prototípusa a budapesti laboratóriumban.

Alternatív müográfiai módszerek

Az Újvidéki Egyetem és a REGARD Csoport együttműködésében létrejött Muon Camera berendezés célja tárgyak (például régészeti leletek) anyagi összetételének roncsolásmentes vizsgálata a kozmikus müonok által keltett másodlagos részecskék megfigyelésével[16].

Több nemzetközi csoportban a müonok nemzetbiztonsági felhasználásán is dolgoznak. A motiváció abban rejlik, hogy egy esetleges radioaktív szállítmány államhatáron való átcsempészése lehetséges úgy, ha azt kellően leárnyékolják vassal vagy ólommal. Így a határőrök sugárzás mérő eszközei nem tudják kimutatni a sugárzó anyag jelenlétét. A nagy energiájú müonok azonban képesek kicsi vagy semekkora szórást szenvedve áthatolni az árnyékoláson, miközben a belül található nagy tömegszámú urán atomokon nagyobb mértékben szóródnak [17]. Így egy jármű felé és alá helyezett detektorrendszerrel vizsgálható a szóródás mértéke és következtetni lehet a rakomány anyagi minőségére.

1.4. A müografikus képalkotás alapjai

A szakdolgozatomban is használt képalkotási módszer alapja, hogy a célterület felől érkező kozmikus müonok pályáját meg tudjuk állapítani. A mérés módszerétől függően különböző zenitszögben érkező müonokra van szükség. Felszíni müográfia során többnyire közel horizontális, felszín alatti müográfia esetén a közel vertikális események haladnák át a célterületen. A 6. ábrán látható a különböző zenitszögben érkező kozmikus müonok fluxusa $\rho = 2.65~{\rm g/cm^3}$ sűrűségű kőzeten történő áthaladás után.



6. ábra. Müonfluxus logaritmikus skálán a behatolási mélység függvényében [6]

A 6 ábrán látható, hogy a felszínen ritkábbak a felszíni müográfiához szükséges, közel horizontálisan beérkező müonok, azonban ezek vastagabb kőzeten is képesek áthatolni, ami a mérésünk szempontjából hasznos. Szintén megfigyelhető az ábrán, hogy a gyakorlatban reális, párszáz méter kőzeten áthaladó müonok fluxusa viszonylag kicsi, ezért indokolt a hosszú (több hetes, akár több hónapos vagy éves) mérési idő. A Bethe-Bloch formula megadja, hogy egy részecske mennyit veszít az energiájából anyagon való áthaladás során. A formula müonokra vonatkozó formája két tagból tevődik össze:[18]

$$\langle -dE/dx \rangle = a(E) + b(E)E \tag{2}$$

ahol E az összes energia, a(E) az elektromos fékezési hatás, b(E) pedig különböző sugárzási folyamatok összesített hatása. A képlet kibontott alakja a következő:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx}\right\rangle = K\frac{Z}{A}\frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2}\ln\frac{2m_ec^2\beta^2\gamma^2Q_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} + \frac{1}{8}\frac{Q_{max}^2}{\left(\gamma Mc^2\right)^2}\right] + \Delta \left|\frac{dE}{dx}\right| \quad (3)$$

ahol $K = 4\pi N_A r_e^2 m_e^2 c^2$ elektronsugártól és -tömegtől valamint az Avogadroszámtól függő állandó, Z az anyagot alkotó atomok rendszáma és A a tömegszáma, c a fénysebesség, M az áthaladó részecske tömege és β a sebességének és a fénysebességnek a hányadosa, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ részecskesebességtől függő állandó, I az elektronok átlagos gerjesztési energiája, δ a sűrűségi korrekció az elektromos energiaveszteségre, Q_{max} pedig az elektron maximális visszaverődési energiája.



7. ábra. 1 TeV-es müonok impulzusa 3 méteres vas rétegen való áthaladás után [18]

A 7 ábrán megfigyelhető, hogy a nagyenergiás müonok valóban képesek energiájuk töredékét elvesztve áthatolni vastag céltárgyakon is.

1.5. A müografikus képalkotás háttere

A klasszikus gázdetektorok felszíni és felszín alatti változatai között a legjelentősebb különbség, hogy a felszíni detektorok gáztöltésű kamrái között néhány helyen ólomlemezek helyezkednek el. Mivel a kozmikus sugárzás rengeteg különböző részecskéből tevődik össze, a detektorok pedig nem tesznek különbséget a beérkező részecskék között, így igyekeznünk kell hatásos - és lehetőleg egyszerű - módszereket keresni a nekünk megfelelő müonok kiválasztására. Az alacsony energiájú részecskék leghatásosabban úgy szűrhetők ki, ha ólomlapokat helyezünk a detektorrendszer egyes kamrái közé, melyben azok elnyelődhetnek vagy nagy mértékben szóródhatnak. Ezek az események az adatfeldolgozás során egyszerű lépésekkel azonosíthatók és eltávolíthatók az adatrendszerből.

A felszín alatti detektorok esetében nem szükséges ilyen lemezek alkalmazása, hiszen akár néhány méter vastag kőzetrétegen is kizárólag nagy energiás részecskék juthatnak át. Egy bányában megfigyelt jelenség, hogy rengeteg eseményt rögzít a detektorrendszer, azonban ezeknek jelentős része nem kozmikus eredetű. A pályák analízise során észrevehető, hogy túlnyomóan kis energiás részecskék érkeznek a műszerbe véletlenszerű irányokból. Ennek a sugárzásnak a forrása azonban nem lehet a légkör, hanem a minden bizonnyal a radioaktív atomokat tartalmazó kőzetek okozzák.

2. A Mount Etna detektorrendszer bemutatása

2.1. Működési elve

Az Etna vulkánhoz tervezett detektorrendszer alapja nyolc darab MWPC (multiwire proportional chamber) technológiájú detektor. Ezek olyan kamrák, melyek ionizáción keresztül képesek töltött részecskék észlelésére [19]. A hagyományos "sokszálas kamra" koncepció szerint a kamrát gázkeverékkel töltik meg, valamint magasfeszültségre kapcsolt anód vezetékeket húznak keresztül rajta, miközben a kamra falai földelve vannak, így katódként funkcionálnak. A kamrában így közel homogén elektromos tér lesz jelen, kivéve az anódvezetékek közvetlen környezetében (lásd: 8 ábra). Amikor egy töltött részecske keresztülhalad a kamrán ionizálja a gázt, a trajektóriáját érintő anódvezetékek környezetében pedig elektronlavina indul meg, ugyanis a lokálisan inhomogén elektromos tér gyorsítja a szabad elektronokat, melyek így elegendő energiát nyernek ahhoz, hogy egy semleges atommal ütközve újabb elektront szakítsanak le annak héjáról. Mivel így exponenciálisan növekszik az elektromok száma, ezért egy lavina kellően nagy elektromos áramot generál ahhoz, hogy a kiolvasó elektronika digitális jelként rögzíthesse.



8. ábra. Térerősségvonalak egy MWPC kamra elektromos terében [20]

A müografikus méréseknek azonban vannak sajátosságai, melyekre érdemes optimalizálni a hagyományos detektrokat. A REGARD csoport saját fejlesztésű kamrái több szempontból is alkalmasabbak az ilyen típusú felhasználásra. [21]

2.2. Felépítése

Bár az MWPC kamrák már több évtizede léteznek, a Wigner FK kutatói terepi tapasztalatok alapján saját fejlesztéseket végeztek el az alapvető dizájnon [21]. A fő szempontok az alábbiak voltak:

- Nagy felületű detektor építése költséghatékonyan
- Környezeti körülmények elviselése hosszú időtartamon át
- Müonpályák nyomonkövethetősége
- Felesleges detektorkomponensek elhagyása
- Fenntartható és biztonságos működés biztosítása

A nagy felület azért szükséges, mivel a nagyenergiás kozmikus müonok fluxusa időben állandó kis érték, viszont a detektor felületének növelésével nagyban csökkenthető a szükséges mérési idő, ami alatt elegendő eseményt regisztrálhatunk egy megfelelő statisztika elkészítéséhez. A költséghatékonyság is fontos, hiszen ugyanannyi pénzből több detektort építve szintén gyorsabban készíthetünk jó statisztikát, valamint az esetlegesen keletkező károk is könnyebben javíthatóak. Mivel a mérések nem laboratóriumi körülmények között zajlanak, és a tipikus terepi viszonyok bányától napsütötte felszínig terjednek, ezért kiemelten fontos a hőmérsékleti, pára- és légnyomásviszonyok széles spektrumán zavartalan működés. A pályák nyomonkövethetősége az előző bekezdésben említett módon, több kamra egymás mellé/alá helyezésével érhető el kettő dimenzióban. A harmadik koordináta kiolvasására egyéb vezetékek elhelyezése szükséges a kamrákban. Az MWPC kamrákat nagy fluxusú események vizsgálatára tervezték, ami a müonok esetében nem áll fent, ezért nem szükséges a megszokott időbeli felbontás elérése. A hosszú terepi alkalmazás egyéb következményei, hogy a rendszernek kis áramfogyasztással kell rendelkeznie, hogy akkumlátorról is üzemelhessen, valamint, hogy a kamrákban alkalmazott gáz nem lehet környezetszennyező, hogy egy esetleges sérülés vagy szivárgás esetén ne okozzon természeti károkat a rendszer. Ezen szempontok alapján több detektorrendszer is épült, amelyek terepi méréseken bizonyították a fejlesztések sikerességét mind felszín felett[13], mind felszín alatt [22]. Az optimalizált rendszer keresztmetszeti képe a 9 ábrán látható:



9. ábra. Az optimalizált detektor keresztmetszeti ábrája [21]

A kamrákban alkalmazott gáz 82-18 %-os keverési arányú argon és szén-dioxid, amelyből egy 80 cm · 80 cm felületű kamrában nagyjából 13 liter található. Az anódszálak 20-25 mikrométer vastag aranybevonatú volfram szálak, melyek az elektronlavina létrejöttét biztosítják. Velük egy síkon helyezkednek el a FW (Field Shaping Wire) szálak, amik 100 mikrométer átmérőjű bronz vezetékek, 12 mm-es közönként elhelyezve. Ezek a szálak rögzítik a pálya x koordinátáját. Erre a síkra merőlegesen elforgatva találhatók a PW (Pick-Up Wire) szálak, melyek megegyeznek az FW vezetékekkel, azzal a különbséggel, hogy 4 mm-es közzel vannak elhelyezve, így három ilyen szál együttese adja meg a müonpálya y koordinátáját. A z koordinátát több kamra egymás mellé helyezéséből olvashatjuk ki [21]. Az egy x vagy y koordinátát meghatározó vezetékeket pad-nek nevezzük.

Az Mt. Etna detektorrendszerben nyolc kamra, x irányban 96 pad, y-ban pedig 64 pad található, így a detektorrendszer oldalai nagyjából 120 és 80 cm szélések, a rendszer pedig körülbelül 1.8 méter hosszú. A koordinátákat a síkokban, a kamra szélén található kiolvasó elektronika rögzíti digitális jelként. A kiolvasást és az adatok tárolását egy Raspberry Pi mikroszámítógép végzi. A tárhelygazdálkodás optimalizálása miatt nem kerül minden beérkező jel rögzítésre. A rendszer, ha valamelyik kamrából jelet kap, akkor nyit egy időablakot, amin belül még legalább két másik kamrának is jelet kell küldenie ahhoz, hogy a koordináták véglegesen rögzítésre kerüljenek.

A kamrákban támasztó oszlopok is elhelyezésre kerültek, melyek a rendszer mechanikai stabilitását erősítik. A terepi alkalmazás vagy a telepítés során könnyen érheti mechanikai terhelés a kamrákat, amelyek nagy méretük miatt stabilizáló oszlopokat igényelnek a serülések elkerülése céljából. Ezek az oszlopok lokálisan és kis mértékben csökkentik a kamrák nyomonkövetési hatásfokát, azonban ez a hatás elhanyagolható a hasznosságuk tekintetében [21] (lásd: 10 ábra).



10. ábra. Nyomonkövetési hatásfok a stabilizáló oszlopok környezetében [21]



11. ábra. Az MtEtna detektorredszer tesztmérésen a WignerFK laboratóriuma melletti parkolóban, nyilakkal jelölve a használt koordinátarendszer.

Megfigyelhető, hogy a rendszer kamrái nem egyetlen vízszintes síkban helyezkednek el. Ennek az oka az, hogy a rendszer nem a közvetlenül előtte álló területet vizsgálja, hanem a 12 sematikus ábrán látható módon meg kell dönteni a vulkánkürtőre való fókuszáláshoz. Ezt a döntést elkerülendő egy olyan váz épült a rendszerhez, melyen az egyes kamrák helyzete konfigurálható. Szintén láthatóak a hármas-négyes, valamint ötös-hatos kamrák közötti ólomrétegek. A rendszer a 11 képen a Wigner FK udvarán látható, azonban a mérések, amikkel dolgoztam Olaszországban készültek. A rendszert a szállításhoz darabjaira szerelték és a helyszínen újra megépítették. A végleges geometriát az 1 táblázat tartalmazza:

Kamraszám	z pozíció [mm]	y pozíció [mm]	x pozíció [mm]
1	0	2	0
2	60	11	0
3	295	58	0
ólomlemez	420	-	-
4	870	172	0
5	990	196	0
6	1110	220	0
ólomlemez	1220	-	-
7	1720	340	0
8	1830	360	0

1. táblázat. Az MtEtna detektorrendszer geometriája



12. ábra. Vulkánkutatás sematikus rajzon [6]

2.3. Adatstruktúra

A rendszer minden észlelt eseményhez rögzít egy hozzá tartozó azonosító számot (ID), az eltelt időt a legutóbbi esemény óta, egyes környezeti tényezőket (légnyomás, hőmérséklet, páratartalom), diagnosztikai adatokat (melyik kamrák működnek) és az áthaladó részecske koordinátáit. A számításaimhoz a koordinátákra volt szükségem, ezért kiemelt fontosságuk miatt a rögzítésük módját színkódokkal jelölve ismertetem a 13 ábrán.

adott kamrában ennyi pad rögzített x koordinátát adott kamrában rögzített x koordináták adott kamrában ennyi pad rögzített y koordinátát adott kamrában rögzített y koordináták

első kamra

második kamra

 4
 35
 36
 37
 38
 4
 37
 38
 39
 40
 3
 39
 40
 4
 31
 32
 33
 34
 első esemény

 4
 84
 85
 86
 87
 4
 15
 16
 17
 18
 3
 86
 87
 88
 4
 21
 22
 23
 24
 második esemény

 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 0
 3
 54
 55

 0
 0
 0
 0
 16
 17
 6
 39
 40
 41
 53
 54
 55

 0
 0
 0
 2
 66
 67
 3
 13
 14
 15
 2
 79
 80
 4
 41
 42
 43

 0
 0
 0
 0
 16
 3
 84
 85
 86
 4
 5
 7
 8
 4
 79
 80
 81
 82

13. ábra. A tárolt koordináta adatok egy mérési fájlban

A tárolt adat mennyisége átlagosan nagyjából 330 byte/esemény, egy adatfájl pedig egymillió eseményt foglal magába. Az általam vizsgált mérés hossza 13 nap és 3 óra volt és ez idő alatt nagyjából 17.3 millió esemény regisztrálódott, ami átlagosan óránként körülbelül 55 ezer darabot jelent. Ezek alapján óránként körülbelül 17.3 MB adat kerül rögzítésre. A detektorrendszert így elegendő ellátni egy SD kártyával, ami több hónapnyi mérési adatot is könnyedén tárolhat. Az összes REGARD detektorrendszert építéskor felszerelik egy WiFi routerrel, így a bash ssh parancsával laptoppal vagy akár mobil telefonnal is rá lehet kapcsolódni a lokális hálózatukra, így megkönnyítve az adatletöltés folyamatát.

3. Eredmények

3.1. A képalkotás optimalizálásának célja

Habár az előző részben számolt 55 ezer esemény/óra nagy részecskefluxust jelent, azonban ezen adatok egy része vagy nem kozmikus müonokból származik, vagy a trajektóriájukból fakadóan nem alkalmasak a képalkotásra. A célom az volt, hogy a szakdolgozatomban olyan szűréseket végezzek, melyekkel kiválaszthatom a müográfiai képalkotás szempontjából hasznos jelentéssel bíró eseményeket az adathalmazból. A kutatások során a vizsgált célpontokban keresünk sűrűséghossz anomáliákat, azonban ezekről a területekről kevesebb hasznos adat érkezik be az elnyelődések következtében. Ezért különösen fontos egy megfelelő modell a háttér pontos meghatározására és kiiktatására, ugyanis annak a mértéke nagyságrendileg hasonló a jeléhez, így elnyomhatja a keresett anomáliát.

3.2. Fizikai és kombinatorikai háttér

Először is megvizsgáltam, hogy milyen tipikus események jelenhetnek meg az adatok között, és mik okozzák ezeket. A padeket a következő effektusok aktiválhatják a keresett müonokon kívül:

- Alacsony energiájú kozmikus részecskék
- Radioaktív sugárzásból származó részecskék
- Detektorban keletkezett másodlagos részecske
- Elektronikai zaj

Ezeknek a fellépése véletlenszerű, így időfüggetlen jelenségek.

3.2.1. Alacsony energiájú kozmikus részecskék

Alacsony energiájú kozmikus részecskék döntően kis energiás müonok és nagy energiás, kozmikus záporban keletkezett elektronok lehetnek. Ezeknek a részecskéknek elég nagy energiájuk van ahhoz, hogy behatoljanak a detektorrendszerbe és több kamrát is megszólaltassanak. A képalkotás szempontjából azonban felesleges részei az adatrendszernek, hiszen nem hordoznak információt a célterület sűrűséghosszáról. A kiszűrésük lehetséges azzal, hogy ólomlemezeket helyezünk a detektor kamrái közé, melyek eltérítik vagy elnyelik ezeket a részecskéket. Az adatrendszerben az eltérített részecskék trajektóriája vizsgálható, és különböző szűrési módszerek alkalmazhatók a megkölönböztetésükre. Ezekkel részletesebben a 3.3 bekezdésben foglalkozok.

3.2.2. Elektronikai zaj hatása

Ritkán megjelenő hatás, magában nem is rögzíti a detektor, ugyanis csak egy kamrát (és azon belül is csak egy-két padet) érint egyszerre. Ezen egyedi megszólalásokat a nyomkövető algoritmus kiválóan szűri, hiszen a müonpályákhoz több kamrán kereszülhaladó egyenes nyomot követelünk meg. Akkor jelenhet meg az adatok között, ha egy másik eseménnyel egy időben következik be.

3.2.3. Radioaktív sugárzás hatása

A radioaktív sugárzásnak három fő fajtája van, α , β és γ . Habár az α sugárzásból származó ⁴/₂He atommagok képesek lennének ionizálni a gázt a detektorban, a kamrák falán az alacsony áthatolóképességükből fakadóan nem képesek áthatolni, így ezek a részecskék nem jelennek meg a rögzített adatokban. A β sugárzásból származó elektronok többnyire szintén nem képesek átjutni a detektorfalon, de ha egy nagyobb energiájúnak mégis sikerül akkor is legfeljebb egyetlen kamrán aktiválhat egy-két pad-et. Ennek a jelenségnek akkor van jelentősége, ha pontosan egy időben történik meg egy műon áthaladásával. A következőkben tárgyalni fogok olyan szűrési módszereket, melyek képesek eltávolítani az ilyen zajjal terhelt eseményeket.

A γ sugárzásból származó fotonok elég nagy áthatoló képességgel rendelkeznek ahhoz, hogy bejussanak a detektorba, ahol fotoeffektussal vagy Comptoneffektussal elektront szabadíthatnak fel a gázatomok elektronhéjairól. Ez a β sugárzással és az elektronikaival megegyező zajt eredményez, viszont náluk gyakrabban léphet fel.

A radioaktív sugárzásból származó zaj általában nem jelent problémát, azonban előfordulhat, hogy olyan helyen végzünk méréseket, ahol a természetes háttérsugárzás relatíve nagy. A finnországi Kemiben található krómbányában elhelyezett detektor adatait vizsgálva kiváló példák találhatók ezekre a jelenségekre, és jól szemléltethető, hogy mennyire fontos lehet számításba venni őket. A hasonló felszín alatti detektoroknál a 6 ábrán látható módon akár nagyságrengekkel csökken a müonfluxus a felszín felettiekhez képest, azonban a bányában rengeteg radioaktív izotópot tartalmazó kőzet található. Így a rögzített eseményeknek jelentős hányada valójában radioaktív háttér. A 14 ábrán látható egy olyan esemény, mely kétséget kizárólag a véletlen háttér eredménye, ugyanis a három aktivált kamra nem függ össze és nem rajzol ki egyenes trajektóriát. Bizonyos esetben a véletlen megszólalások azonban hamis részecskepálvákat is eredményezhetnek. A 15 ábrán látható egy olyan esemény, mely müonpályának (vagyis tracknek) tűnhetne, ha egyeneseket illesztenénk a koordinátákra. Azonban jobban megvizsgálva látható, hogy a track nem folyamatos, tehát nem lehet müon a forrása. Ez az esemény egy úgynevezett "fake track".



14. ábra. Véletlen beütések egy Kemiből származó mérési adatfájlból (egy sor egy kamrát jelent, ponttal jelölve az inaktív és X-el az aktiválódott padek)



15. ábra. Hamis track egy Kemiből származó mérési adatfájlból

Mivel a radioaktív zaj a korábban említett módon időfüggetlen, annak a valószínűsége, hogy egy kamra megszólal $P_1 = p$. Megállapítható, hogy p valószínűség mérési helyszínenként változik a radioaktív háttérsugárzás függvényében, azonban rögzített helyen időben állandónak tekinthető. Több kamra egyszerre történő megszólalásának valószínűsége a valószínűségek szorzata, vagyis n darab megszólalt kamra esetén $P_n = p^n$. Mivel N az összes kamraszám, amiből kiválasztunk ndarabot megszólalásra (tehát n = 1, 2, ...N), így annak az esélye, hogy véletlenszerűen pontosan n darab kamra egyszerre szólal meg:

$$P_n = \binom{N}{n} p^n \tag{4}$$

Ez azonban még nem eredményez hamis tracket. Ahhoz figyelembe kell venni, hogy az egymás melletti kamrákban nem mindegy, hogy melyik padek szólalnak meg. Rögzítsük le az első és az utolsó kamrában a track elejét és végét. Ez után kössük ki, hogy akkor számít tracknek az esemény, ha az egyes kamrákban aktiválódott padek helyei -1, 0 vagy 1 értékkel térhetnek el az előző kamrában megszólaltakétól. Így annak a valószínűsége, hogy a megfelelő padek aktiválódtak k = 3/m, ahol m a kamrákban található padek száma. Mivel két kamrában ezt nem kell figyelembe vennünk a rögzített feltétel miatt, így annak az esélye, hogy fake tracket rögzít a rendszer kizárólag zajból fakadóan:

$$P_{fake} = \binom{N}{n} p^n k^{n-2} = \binom{N}{n} p^n \left(\frac{3}{m}\right)^{n-2}$$
(5)

p értéke számítható az alábbi módon: $\left[\binom{N}{n}/\binom{N}{n-1}\right] p = P_n/P_{n-1}$. A számításaim során itt n = 5 értékkel dolgoztam. Egymillió eseményt vizsgálva annak a valószínűsége, hogy pontosan négy kamra szólalt meg 44.67 % volt, annak pedig, hogy pontosan öt darab 24.76 %. Ezek alapján [4/5] p = 0.554, tehát p = 0.693-nak adódott.

A MEV projekt során a kutatók egy három szcintillátorból álló detektorrendszert használnak [12]. A fenti megközelítés szerint az ez által a rendszer által rögzített radioaktív háttérből származó hamis események aránya az adatrendszerben:

$$P_{fake} = \binom{3}{3} 0.693^3 \cdot \left(\frac{3}{64}\right)^1 = 0.0156 = 1.56 \%$$

És egy nyolc kamrás detektor nyolc pontos trackjeire:

$$P_{fake} = \binom{8}{8} 0.693^8 \cdot \left(\frac{3}{64}\right)^6 = 5.64 \cdot 10^{-10} = 5.64 \cdot 10^{-8} \%$$

A fenti 1.56%-os háttér a teljes tartományon értelmezett, általában a kisebb intenzitású részeken kell 1% körüli pontossággal mérnünk, így a fenti háttér a keresett jelenséggel azonos nagyságrendbe esik. Nyolc kamra használatával már elhanyagolható lesz a véletlen zajból keletkezett hamis események aránya, ezért indokolt az ilyen detektorrendszerek alkalmazása.

3.2.4. Másodlagos részecskék hatása

A detektorban keltett másodlagos részecskék forrása elsősorban egy áthaladó müon. Gyakori eset, hogy az áthaladó müon elég nagy energiájú elektront kelt ahhoz, hogy az a kamrán végighaladva az összes padet aktiválja. Ezeket úgy nevezzük, hogy δ -elektron. A 16 ábrán látható a második kamrában egy, az eseménnyel egy időben megjelenő elektronikai vagy radioaktív zaj, a kozmikus müon az ötödik kamrában lép be a rendszerbe, a hatodikban pedig keletkezik egy δ -elektron. Ezen események jól szűrhetőek, ha az adatfeldolgozás során kikötjük, hogy a kiválasztott eseményekben egy-egy kamrán legfeljebb hány pad aktiválódhatott.



16. ábra. δ -elektron egy Kemiből származó mérési adatfájlból

3.3. Kisenergiás háttér szűrése

Az előzőekben felsorolt hátterek nagyrészt jól kezelhetőek, ám a felszíni müografikus mérések esetén a kisenergiás részecskék adta valós, de nem a céltárgyból érkező nyomok kiszűrése a legnehezebb feladat. A bemutatandó módszer ennek egy megoldását célozza és demonstrálja valós mérési adatokon.

A szakdolgozatomban a Python programozási nyelvet használtam a számításaimhoz és a hozzájuk tartozó ábrák elkészítéséhez. A mérések a szicíliai Castello di Mussomeli várat vizsgálták.

3.3.1. Megfelelő események kiválogatása

Azért, hogy a legjobban vizsgálhassam a kisenergiás részecskék adta hátteret a detektorrendszer mind a nyolc kamráján áthaladó eseményekre koncentráltam, ugyanis a 3.2.3 bekezdésben tárgyalt módon minél kevesebb kamrát érintünk, annál nagyobb az esélye, hogy az esemény valójában véletlen zaj. Az alábbi táblázat azt tartalmazza, hogy három különböző, egyenként egymillió eseményt tartalmazó adatfájl eseményei hány százalékban szólaltattak meg bizonyos számú kamrát:

	Legalább megszólalt kamrák száma							
	Öt		Hat		Hé	ét	Nyo	olc
	Szám	%	Szám	%	Szám	%	Szám	%
1. fájl	395651	39.57	140261	14.03	29259	2.93	14968	1.50
2. fájl	395242	39.52	139482	13.95	29144	2.91	14861	1.49
3. fájl	393446	39.34	138962	13.90	28819	2.88	14580	1.46
átlag	394779.67	39.48	139568.34	13.96	29074	2.91	14803	1.48

2. táblázat. Különböző kamraszámokra vágás után megmaradt események száma

Felszíni müográfiás képalkotásra általában legalább hat kamrás trackeket szokás használni, azonban én a legtisztább eredményekért a továbbiakban az összes kamrát aktiváló, úgynevezett nyolc pontos trackeket használtam. Az előző bekezdésben tárgyalt gyakori δ -elektronokból és egyes radioaktív/elektronikai zajjal terhelt események kiszűrhetőek azzal, ha elhagyunk olyan eseményeket, amelyek egy kamrán belül egy adott számú padnél többet aktiváltak. A számításaim során legfeljebb 5 pad megszólalását engedélyeztem kamránként, ami jó közelítéssel a nyolc pontos trackek felét tartotta meg a szűrés után. Innen is látszik, hogy indokoltak a hosszú, akár hetekig vagy hónapokig tartó mérések egy vizsgált célpontnál. A következőkben ismertetek két eltérő megközelítést a továbbra is kisenergiás zajjal terhelt események kiszűrésére.

3.3.2. Khí négyzet próba

Az alacsony energiájú kozmikus részecskék kiszűrésére az egyik eredményes vizsgálati módszer, ha minden eddig megtartott esemény trajektóriájára egyenest illesztünk és χ^2 próbának vetjük alá őket. Így minden trackhez tartozni fog egy szám, mely jellemzi a tökéletes egyenestől való eltérését. Ebből könnyen szűrhetünk egy maximális értékre, elhagyva a potenciálisan nem megfelelő eseményeket. Mivel a kamrákban akár 5 pad is megszólalhat egyszerre, ezért először is kiátlagoltam a padekhez tartozó pozíciókat és megszoroztam őket 12-vel, így átváltva pad távolságegységből milliméterre, majd ezekre a pontokra illesztettem egyeneseket. A χ^2 próbához használt összefüggés egy eseményre:

$$\chi^{2} = \sum_{i=1}^{8} \frac{\left(E_{i} - O_{i}\right)^{2}}{\sigma^{2}} \tag{6}$$

ahol E az egyenes illesztésből meghatározott várt érték, O a detektor által rögzített koordináták átlaga, σ pedig a detektorkonfigurációhoz tartozó szórás, melyet a rendszerhez tartozó dokumentációk alapján $\sigma = 8.8$ mm-nek vettem. A munkám során felhasznált mérés nagyjából 17.3 millió eseményt tartalmazott. Ezekből körülbelül 110000 darabot tartottam meg az előzetes szűrések után. Ezeknek az eseményeknek a χ^2 szerinti eloszlását a 17. ábra mutatja:



17. ábra. A számított khí négyzet értékek eloszlása X és Y koordinátákra

3.3.3. Kettős egyenes illesztése

Mivel a kisenergiás részecskék könnyen szóródnak nagy tömegszámú atomokon, ezért ha ólommal találkoznak jelentősen irányt változtatnak. Ezért célszerű ólomlemezeket helyezni a detektorrendszer egyes kamrái közé, ugyanis így, ha a negyedik és ötödik kamra között elfelezzük pályát és a két felére két egyenest illesztünk, akkor a meredekség-különbségek nagyságának vizsgálatával azonosíthatjuk a kisebb energiájú részecskéket.

$$f(x)_{1} = m_{1} \cdot x + b_{1}$$

$$f(x)_{2} = m_{2} \cdot x + b_{2}$$

$$D = |m_{1} - m_{2}|$$
(7)

Fontos, hogy nem konkrétan egy adott szóródást vizsgálunk, hiszen nem az ólomlemezek síkjában történt a trackek szeparálása. Így nem kapunk olyan markáns különbség-értékeket, viszont a jó pályáknak egyébként is közel nulla D értékkel kell rendelkezni, az ettől való apró eltérések pedig jól megfigyelhetők az eloszlások hisztogramjain. A számított D értékek eloszlásait a 18 ábra mutatja be:



18. ábra. Meredekség-különbség abszolútértékek eloszlása X és Y koordinátákra

A fenti két módszer a nagyenergiás müonokat átengedi a szűrőn, míg a szóródó kisenergiásokra eltérő mértékben reagálhat, ezek korrelációját vizsgálom a következő fejezetben a mérési adatsoron.

3.4. Háttérelnyomás terepi adatokon

A következőkben megvizsgálom a különböző kisenergiás részecskeszűrők egymással való korrelációját és megbecsülöm, hogy mennyire marad zajjal terhelt az adatrendszer az elvégzett szűrések után.

3.4.1. Mérési elrendezés Mussomeliben

A sűrűséghossz anomáliák keresésére alkalmas fluxustérkép elkészítéséhez az alábbi egyenletet kell alkalmazni:

$$\Phi = \frac{N}{A \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot t} \tag{8}$$

ahol Φ a fluxus, N a beérkezett müonok száma, A a felület, α a zenitszög, ϵ a detektor hatásfoka t pedig az eltelt idő. A szakdolgozatomban azonban nem volt célom ilyen térkép előallátása, ugyanis az általam vizsgált probléma leválasztható a detektorhatásokról és korrekciókról. Így elégséges egymás függvényében ábrázolni a müonpályákra illesztett egyenesek x és y irányú meredekségeit.



19. ábra. X és Y irányú meredekségek egymás függvényében ábrázolva



20. ábra. A Mussomeli vár látképe [23]

Az 20 és 19 ábrákon jól látszik, hogy a müografikus kép a vár és a hegy minden részletét képes kirajzolni. A két kép nem megegyező irányból készült, ugyanis a detektort a hegy aljába telepítették a kollégák, viszont így is jól beazonosítható például a bal oldali szikla, a várfalak vonulatai és a hegycsúcs. A kép nem fedi le a teljes várat hiszen a felső részeken nem várunk ismeretlen járatokat. A meredekségek által lefedett maximális M intervallum n darab kamrán regisztrált eseményre a következő képlettel adható meg:

$$M_x^n = 2 \cdot \frac{x}{z_n} \tag{9}$$

$$M_y^n = 2 \cdot \frac{y}{z_n} \tag{10}$$

ahol $x = 96 \cdot 12 \text{ mm}, y = 64 \cdot 12 \text{ mm}$ a detektor méreteiből fakadóan. z_n az 1 táblázatból olvasható ki. A kétszeres szorzó figyelembe veszi, hogy lehetséges pozitív és negatív meredekség is. Nyolc pontos trcakek esetén az elméleti intervallumok:

$$M_x^8 = 2 \cdot \frac{96 \cdot 12 \text{ mm}}{1830 \text{ mm}} = 1.259$$
$$M_y^8 = 2 \cdot \frac{64 \cdot 12 \text{ mm}}{1830 \text{ mm}} = 0.839$$

Megvizsgálva az adatrendszerben található legnagyobb és legkisebb meredekségeket ezek az intervallumok $M_x^8 = 1.252$ és $M_y^8 = 0.838$ -nak adódtak, melyek jól tükrözik az elméleti várakozásokat.

3.4.2. Khí négyzet értékek és meredekség-különbségek összevetése

Érdemes megvizsgálni, hogy milyen kapcsolat áll fenn a χ^2 és a D értékek között. Ezért a 21 ábrán ábrázoltam a kétfajta értéket egymás függvényében x és y koordinátában:



21. ábra. Meredekség-különbségek és khí négyzet értékek korrelációi

A képeken jól megfigyelhető a kétfajta vizsgálati módszerrel számított értékek közti kiváló korreláció, ami patkó szerű alakzatot eredményez az ábrázolásában. A patkó szárain találhatók azok az események, melyeknél korrelál a két szűrés eredménye. A D = 0 és $\chi^2 = 0$ körüli résznél megfigyelhető a csomó, amely a biztosan egyenes pályával áthaladt müonokat tartalmazza. A patkó két szára közötti események azok, melyeket egy nagyobb χ^2 vágás hamis tracknek venne, azonban megtarthatók, ha csak D-ben szűrünk az adatrendszerre.

Az egyes tipikus eseményeket külön is megvizsgáltam. Ehhez írtam egy kódot, amely véletlenszerű eseményeket választ egy adott $[\chi^2_{min}, \chi^2_{max}]$ és $[D_{min}, D_{max}]$ intervallumok által meghatározott adathalmazból, majd ábrázolja az események rendszerben leírt pályáját. A 22 és 23 ábrákon x vetületben vizsgálok trajektóriákat, a mintavételezési feltételek $\chi^2 \in [20, 25]$ és $D \in [-0.025, 0.025]$ voltak, tehát olyan eseményeket kerestem, melyeket egy χ^2 tartományban végzett vágás eltávolítana az adathalmazból, de egy D vágás hasznos tracknek tartana. A két példán jól látszik, hogy van rá esély, hogy valós müonpályákról van szó, melyekkel egy időben jelentkezett valamelyik korábban tárgyalt véletlen zaj. Így beigazolódott, hogy nem elégséges kizárólag χ^2 tartományú vágást végezni az események szétválogatására, ugyanis az hasznos információkat is eltávolíthat.



22. ábra. Első véletlenszerűen választott zajos esemény



23. ábra. Második véletlenszerűen választott zajos esemény

3.4.3. Az új háttérszűrés hatékonysága

Először megvizsgáltam, hogy a különböző vágások milyen hatással vannak a megmaradó adathalmazra. Ehhez kiválasztottam azokat az eseményeket, melyekre igaz a $M_x^8 \in [-0.2, 0.2]$ feltétel, így leszűkítve a 19 ábrát egy belső sávra. Ezeknek az eseményeknek utána ábrázoltam hisztogramokon az M_y^8 értékeit különböző (a 21 ábrán látható korrelációt nagyjából követő) D abszolútérték és χ^2 vágások függvényében:



24. ábra. Különböző vágások hatása az Y irányú meredekségekre

A 24 ábra felső sora a |D| szerinti, az alsó pedig a χ^2 szerinti vágásokat tartalmazza, melyeket minden eseményre mind x és mind y koordinátákban is alkalmaztam. A bal oszlop a teljes y meredekség-intervallumot ábrázolja, a jobb oldali oszlop pedig fókuszál a vár alatti hegy területére, ahol a közel horizontális müonok érkeznek be. Utóbbiakból nem várunk valós trackeket, csak zajt és a váron szóródott alacsony energiás részecskéket. Ennél kisebb meredekséggel tipikusan olyan események érkeznek, amelyek hátulról hatoltak be a detektorrendszerbe. A $M_y^8 \in [0.2, 0.4]$ intervallum az, amelyet a hegy és a vár árnyékol le, vagyis a sűrűséghossz-analízis során az ebbe a halmazba tartozó események hasznos információval bírnak. Az ennél nagyobb meredekségű események célpont fölül érkeztek, így nincs ami leárnyékolja őket, így gyakoribb az előfordulásuk is. Ez után választottam egy-egy olyan vágási értéket, amely nem szűrt ki annyi eseményt, hogy jelentősen csökkentse az adatrendszert a hasznos tartományban. Ezt a két intervallumot $\chi^2 \in [0, 5]$ -nek és $|D| \in [0, 0.04]$ -nek vettem, a két érték korrelációja a vágások után megmaradt eseményekre a 25 ábrán látható.



25. ábra. Kettős vágás együttes hatása khí négyzet és D
 korrelációs ábráján X koordinátákban



26. ábra. Semmilyen és a kettős vágás hatásának összevetése az Y irányú meredekségekre

Ezek után kiszámítottam a teljes y meredekség intervallumra a 26 képen található hisztogramok integráljait, majd elosztottam a vágás nélküli hisztogramét a vágott hisztograméval. Ezzel kaptam egy korrekciós hányadost, mellyel súlyozva újra ábrázoltam a vágott hisztogramot, így egyenletesen visszaigazítva azt a kiindulási állapothoz. A korrekciós hányados értéke C = 1.2789 lett, vagyis ennyiszer több esemény található a vágás nélküli adathalmazban a vágottnál.



27. ábra. A súlyozott Y meredekségek a vágás és a vágás nélküli adatokkal együtt ábrázolva

Ezek után vettem a fontosabb intervallumokra a vágás nélküli és a súlyozott hisztogram lokális integráljait. Definiáljuk Z-t, amely megadja, hogy az összes esemény hány százaléka származik zajból:

$$Z = \frac{A_{minden} - A_{sulyozott}}{A_{minden}} \cdot 100 \tag{11}$$

ahol A_{minden} a vágás nélküli, $A_{sulyozott}$ pedig a súlyozott hisztogram alatti terület integrálja.

Meredekség-intervallum	Valós megfeleltetés	$Z \ [\%]$
[-0.05, 0.15]	Felszín	44.23
[0.15, 0.4]	Hegy és vár	-6.07
[0.4, 0.6]	Égbolt	-0.65

3. táblázat. Zaj arányok a különböző leképezett területeken

Természetesen Z értéke nem lehetne kisebb 0-nál, azonban a súlyozás miatt megjelennek lokális, néhány százalékos pontatlanságok. A célomat elértem, mivel egyértelműen kijelenthető, hogy a vizsgált célterület felől érkező müonokhoz képest elhanyagolható a véletlenszerű zaj, ha elvégezzük a szükséges szűréseket az adatrendszeren.

4. Összefoglalás és kitekintés

A müográfiai képalkotás segítségével képesek lehetünk nagy kiterjedésű objektumok belsejében található sűrűség-anomáliák feltérképezésére. Ez a kutatási módszer számos területen alkalmazható az érckutatástól vulkánok kürtőinek monitorozásáig. A kutatásom során bekapcsolódtam a Wigner Fizikai Kutatóintézet REGARD csoportjának munkájába, amelynek során segédkeztem egy új detektorrendszer megépítésében. A számításaim során a rendszer által az olaszországi Castello di Mussomeli várnál futó mérés adatait használtam fel, valamint a finnországi Kemiben található krómbányából származó adatokat.

A munkám során a természetes forrásokból származó hátterekkel foglalkoztam, amelyek minden müografikus mérési helyszínen jelen vannak. Megneveztem a zajok lehetséges forrásait, valamint megoldásokat kerestem az adatrendszer tőlük való megtisztítására. Megmutattam, hogy ezek az események egyáltalán nem elhanyagolható hányadban találhatók meg a valós mérési adatok között, ezzel alátámasztva a speciális müondetektorok használatának indokoltságát terepi méréseknél. Jól alkalmazható szűrési módszereket sikerült találnom a kisenergiás müonok és elektronok okozta nyomok eltávolítására és megállapítottam, hogy ezek után valóban sikerült egy olyan adatsort előállítanom, amely alkalmas további számításoknál, például sűrűséghossz-meghatározásnál, való alkalmazásra.

A jövőben geofizikus-hallgatóként tervezem folytatni a munkám a kutatócsoportnál, így remélem bekapcsolódhatok a geofizikai modellalkotásba és sűrűségtérképek készítésébe, amiket aztán felhasználhatok az Etna és a Sakurajima vulkánokkal foglalkozó kutatásokban.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a témavezetőmnek, Hamar Gergőnek a rengeteg segítségért, amit a munkám minden terültén nyújtott. Szintén szeretném megköszönni Varga Dezső csoportvezetőnek, hogy lehetőséget biztosított, hogy egy ilyen nagyszerű kutatási területbe kapcsolódhassak be. Valamint köszönöm még Surányi Gergelynek, hogy elvállalta a belső konzulensséget és hasznos tanácsokkal látott el a szakdolgozatom írása közben. Természetesen köszönet illeti a REGARD kutatócsoport minden tagját a szakmai segítségért és a kiváló munkahelyi légkör megteremtéséért.

A kutatásokat a következő pályázatok támogatták: OTKA-FK-135349, ELKH-KT-SA-88/2021, TKP2021-NKTA-10 és TÉT-2020-00224.

Hivatkozások

- T. Wulf: Über die in der Atmosphäre vorhandene Strahlung von hoher Durchdringungsfähigkeit Physikalische Zeitschrift, Volume 10 (1909), 152
- [2] V. F. Hess: Measurements of the Penetrating Radiation During Seven Balloon Flights (1912)
- [3] https://www.hap-astroparticle.org/184.php
- [4] Patkós A.: Részecskék az univerzumban Fizikai szemle 2007/5, 165.
- [5] Horváth D., Trócsányi Z.: Müon: Mi az és mire jó? Fizikai Szemle 68 (2018), 147-153.
- [6] L. Oláh, et al.: : Képalkotás kozmikus részecskékkel Fizikai Szemle 2017/3, 74-78.
- [7] https://cds.cern.ch/images/CMS-PHO-GEN-2017-008-1/file?size= large
- [8] https://www.hep.ucl.ac.uk/creamtea
- [9] https://www.hep.ucl.ac.uk/creamtea/epGeorgeHeadline.png
- [10] L. W. Alvarez, et al.: Search for Hidden Chambers in the Pyramids Science 167 (1970), 832-839.
- [11] H. K. M. Tanaka, et al.: Radiographic measurements of the internal structure of Mt. West Iwate with near-horizontal cosmic-ray muons and future developments Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 555 (2005), 164–172
- [12] G. Gallo, et al.: Three years of muography at Mount Etna: results and perspectives Journal of Instrumentation Volume 17, No. 02 (2022)
- [13] L. Oláh, H. K. M. Tanaka, H. Gergő, V. Dezső: Muographic Observation of Density Variations in the Vicinity of Minami-Dake Crater of Sakurajima Volcano Journal of Disaster Research, Volume 14 (2019), 701-712

- [14] K. Morishima, M. Kuno, A. Nishio, et al.: Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons Nature 552 (2017), 386–390
- [15] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, D. Varga: CCC-based muon telescope for examination of natural caves (DOI) Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 1, 229-234
- [16] https://indico.cern.ch/event/843258/contributions/3610600/ attachments/1929372/3195201/05_Galgoczi.pdf
- [17] https://cms.cern/content/homeland-security
- [18] D. E. Groom, N. V. Mokhov, S. Striganov: Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV-100 TeV Atomic Data and Nuclear Data Tables, Volume 76, No. 2
- [19] G. Charpak, F. Sauli: Multiwire Proportional Chambers and Drift Chambers Nuclear Instruments and Methods 162 (1979), 405-428
- [20] M. Hamid, S. Bri: Micromegas Detector Using 55 Fe X-Ray Source International Journal of Advanced Research 1 (2013)
- [21] D. Varga, G. Nyitrai, G. Hamar, L. Oláh: High Efficiency Gaseous Tracking Detector for Cosmic Muon Radiography Advances in High Energy Physics Volume 2016 (2016), 1962317
- [22] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, D. Varga: Cosmic Muon Detection for Geophysical Applications Advances in High Energy Physics, Volume 2013 (2013), 560192
- [23] https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/0c/55/ae/d6/ view-of-the-castle-and.jpg