Képalkotás kozmikus müonok keltette másodlagos részecskékkel

BSc Szakdolgozat

Szerző: Hajnal Dániel Konrád ELTE TTK Fizika BSc III.

Témavezető: Dr. Hamar Gergő Wigner Fizikai Kutatóközpont

Nagyenergiás Fizika Osztály

Belső konzulens: Dr. Nagy Márton Imre ELTE TTK Atomfizikai tanszék







Eötvös Loránd Tudományegyetem Budapest, 2021. május 19.

Kivonat

A világűrből érkező kozmikus sugárzás Föld felszínét elérő komponense müonokból áll. Ezen nagy energiás müonok anyagon áthatolva másodlagos részecskéket kelthetnek, amelyek mérésével egy új roncsolásmentes képalkotási lehetőség nyílik meg.

A fenti elven működő első kísérleti elrendezést magyar-szerb kollaborációban építették. A dolgozatban bemutatom a mérési összeállítást és a kísérleti adatok analízisét. Méréssorozatok kiértékelésével vizsgáltam az előre- és oldalra-szórási régiókat, a céltárgy helyének meghatározhatóságát, ólom és alumínium jeleit, illetve összehasonlítottam ezeket a szimulációs jóslatokkal.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
	1.1. Kozmikus háttérsugárzás	3
	1.2. Müográfia	4
	1.3. Másodlagos részecskék	5
	1.4. Nyomkövető detektorok	6
	1.5. Szcintillációs detektorok	7
	1.6. Motivácó	7
2.	A MUCA kísérleti összeállítás bemutatása	8
	2.1. Felépítés	8
	2.2. Lehetséges alkalmazások	9
	2.3. Korábbi eredmények	10
	2.4. Adatok feldolgozása, képalkotó eljárás	11
	2.5. Tervezett kísérleti fejlesztések	12
3.	Eredmények	13
	3.1. Háttér meghatározása	13
	3.2. Jel maximalizálása	15
	3.3. Céltárgy függőleges helyzetének meghatározása	17
	3.4. Elmosódás- a beérkező müonok szögének maximuma	19
	3.5. Energiakalibráció	21
	3.6. Összevetés szimulációval	22
	3.7. Különböző anyagok összehasonlítasa	25
	3.8. Szcintillátorok hatásfoktérképe	28
4.	Konklúzió	30
5.	Kitekintés	30
6.	Köszönetnyilvánítás	31
Hi	Hivatkozások	

1. Bevezetés

A dolgozatban egy olyan mérőeszközt ismertetek, illetve használom a mérési eredményeit, ami a kozmikus müonok által keltett részecskék detektálásával szerez információt arról a tárgyról, amelyen a müonok áthaladtak.

Az 1. fejezetben bemutatom a mérések szempontjából releváns fizikai folyamatokat, illetve az alkalmazott detektorokat. A 2. fejezetben vázolom a kísérleti összeállítást, az eddigi eredményeket, az adatfeldogozás lépéseit. A 3. fejezetben a munkámat mutatom be, fő célom a szimulációs és a mért adatok összehasonlítása volt (3.6. fejezet), az ehhez szükséges optimalizációs lépéseket is taglalom.

1.1. Kozmikus háttérsugárzás

A világűrből a Föld légkörébe érkező nagy energiájú kozmikus sugárzás, mely főként protonokból, illetve alfa részecskékből áll, a légkör atomjaival ütközve egyéb részecskéket hozhat létre. Ezeknek a részecskéknek (és az általuk keltett egyéb, másodlagos részecskéknek) azon része, amelyik eléri a földfelszínt, felelős a világűrből érkező, embereket érő sugárterhelésért. Az egyik ilyen részecske, ami a légkörben keletkezik, az a müon.

A müonfluxus a Föld felszínén nagyságrendileg 1 müon percenként négyzetcentiméternyi felületen. Az érkező müonok átlagos energiája 2-3 GeV, de ennél akár 10 nagyságrenddel nagyobb energiájú müon is érkezhet. Az energiaspektrumot az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Kozmikus müonok spektruma [1].

A kozmikus müonok zenitszög szerinti eloszlása az átlagos energiatartományon \cos^2 függvénnyel arányos [2]. Ezt azzal lehet szemléletesen indokolni, hogy minél közelebb

van egy müon pályája a függőlegeshez, annál kevesebb utat kell megtennie, hogy elérje a földfelszínt, tehát kisebb annak a valószínűsége, hogy elbomlik.

1.2. Müográfia

A müográfia egy képalkotó eljárás, amivel egy nagyobb objektum projekcióját kaphatjuk meg, müonok felhasználásával. Ahhoz hasonlít, mint amikor röntgenképet készítenek, csak fotonok helyett müonok nyelődnek el vagy haladnak át a tárgyon.

A müonok áthatolóképessége adott közegben függ a közeg elektronsűrűségétől. Minél sűrűbb, illetve nagyobb rendszámú a közeg, annál több energiát veszít egy müon, ha áthalad rajta.

Amikor egy objektumon müonok haladnak át, akkor az alacsonyabb energiájú müonok elnyelődnek. Ez a müonok lineáris energiaátadása miatt van (Bethe-Bloch formula [3], lásd 2. ábra). Minél vastagabb az objektum, annál magasabbra kerül ez a vágás a müonok energiaspektrumában. Ezt megfordítva, a müonok energiaspektrumának vagy a müonfluxusnak a mérésével megállapítható, hogy mekkora anyagmennyiségen, vagy milyen sűrűségű anyagon haladtak keresztül.



2. ábra. A Bethe-Bloch formula szemléltetése.

Előfordulhat, hogy egy ismert nagyságú objektum belső szerkezetét (például, hogy merre vannak benne üregek) szeretnénk megállapítani. Ezt úgy tehetjük meg, hogy az objektum alá elhelyezünk egy müondetektort, és a különböző irányokból érkező müonfluxust mérjük. Ha több pontból figyeljük meg a fluxust, akkor az üregek pontos helyét is meg lehet határozni.

Ilyen módszereket először az 1970-es években alkalmazott a Luis Walter Alvarez vezette csoport, a Kephrén-piramisban kerestek titkos járatokat [4]. Ma főként barlangok kutatására [5], és vulkánok megfigyelésére [6] használják. Aktív vulkánok vizsgálatokor magma vagy kőzet mozgását látják, a müonfluxus-változásokból.

1.3. Másodlagos részecskék

Azokat a részecskéket nevezzük másodlagosnak, amiket egy másik részecske kelt mozgása során. A részecskék keltéséhez szükséges energiát a mozgó részecske kinetikus energiájának csökkenése biztosítja.

A töltött részecskék energiavesztesége anyagban főként elektromágneses kölcsönhatás révén történik. Az energiaveszteséget a Bethe-Bloch formula [3] írja le. A kozmikus müonok leadott energiájának legnagyobb része ionizációra fordítódik [7], de akár újabb másodlagos részecskék (fékezési sugárzással fotonok, párkeltéssel elektron-pozitron párok) is létrejöhetnek. Ionizáció során a müonok ütköznek az atomban lévő elektronokkal, és akkora energiát adnak át, hogy az elektronok nem lesznek többé kötött állapotban. Az így leszakított (delta) elektronok másodlagos részecskék, amik akár további atomokat is ionizálhatnak, illetve fékezési sugárzással [8] fotonokat kelthetnek.

Mivel az energialeadás anyagfüggő, ezért várhatóan a másodlagos részecskék energia-, illetve szögeloszlása függeni fog a céltárgyat alkotó elemektől.

A Muon Camera [9] (részletesebben a 2. fejezetben) a kozmikus müonok keltette másodlagos részecskéket méri. Ezek eloszlásából következtetéseket lehet levonni egy céltárgynak az elhelyezkedéséről (3.3. fejezet), illetve a tárgy anyagáról (ezt a 3.7. fejezetben vizsgálom meg). A kozmikus müonok jellemző energiatartományán (GeV nagyságrend) a leadott energiájuk nagy része delta elektronok keltésére fordítódik [7], a többi folyamat járuléka ehhez képest elhanyagolható. Ezek alapján azt gondolnánk, hogy a Muon Camera főként elektronokat detektál, azonban nem ez történik, ugyanis az elektronok lefékeződnek, vagy elnyelődnek, tehát legtöbbször fotonok energiáját méri a berendezés.

A mérőszeköz három fő részből áll; közepén a mérőtérfogat található, ahova a vizsgálandó céltárgyat behelyezzük. Ezt körbeveszi négy darab szcintillátor, amik a másodlagos részecskéket detektálják. A mérőtérfogat felett pedig egy müon tracker helyezkedik el, amely az áthaladó müonok pályáját határozza meg. A mérőberendezést a 3. ábra szemlélteti.

1.4. Nyomkövető detektorok

A közelkatódos kamra [10] (Close Cathode Chamber, továbbiakban CCC) egy módosított sokszálas detektor, ami a nagy energiás töltött részecskék (például müonok) helyét határozza meg gázok ionizációját felhasználva.

A sokszálas proporcionális kamrát (MultiWire Proportional Chamber, MWPC) Georges Charpak találta fel 1968-ban [11]. Ezek a kamrák két kondenzátorlemezből állnak, közöttük pozitív nagyfeszültségre kapcsolt anódszálakkal. A kamrák gázzal vannak töltve, aminek az atomjai ionizálódnak töltött részecske áthaladásakor. Az ionizáció során keletkező elektronok elindulnak az anódszálak felé, közben atomokkal ütköznek. Az elektronok efféle, anódszál felé irányuló, állandó sebességű mozgását driftnek hívják. Ez ténylegesen egy gyorsuló-lassuló mozgás, de μs időskálán jó közelítéssel állandó sebességűnek tekinthető. Amennyiben elég nagy az elektromos térerősség, két ütközés között akkora sebességre gyorsulhatnak az elektronok, hogy újabb elektronokat tudjanak leszakítani. Ezt a folyamatot elektronlavinának hívják, és tipikusan az anódszálakhoz közel megy végbe, ugyanis itt sűrűbbek a térerősségvonalak. Az elektronok sokszorozódása miatt a gyengébben ionizáló sugárzás is mérhető az anódszálakon, és az ezen megjelenő feszültségesés arányos lesz az ionizáló részecske által leadott energiával (*proporcionális* kamra).

A CCC [10] és az MWPC közötti fő különbség az, hogy a CCC szálai között nem csak pozitívan töltött anódszálak vannak, hanem negatív feszültségre kapcsolt térformáló szálak is. Így közelebb helyezhetők egymáshoz az anódszálak, jobb helyfelbontást eredményezve. CCC-k esetében az alsó katódsík fel van osztva különböző tartományokra (parketták) a detektor hossza mentén, a szálak irányára merőlegesen. Az elektronlavina után kialakul egy lassan mozgó ionfelhő. Ennek az ionfelhőnek és az elektronoknak a tükörtöltése megjelenik az alsó katódnak a legközelebbi parkettáin. Ezt a jelet kiolvasva a szálon megjelenővel együtt, már két dimenzióban lehet meghatározni, hogy a töltött részecske hol haladt át a detektoron. Egy fontos különbség még, hogy az erősítés kevésbé érzékeny a szál-parketta távolságra, ezért nem igényelnek akkora feszítést a szálak, strapabíróbbá téve azokat. A kisebb mechanikai érzékenység miatt egy ilyen típusú detektor könnyebb, és az előállítása is kevesebb költséggel jár [12].

Több sokszálas proporcionális kamrát egymás alá helyezve rekonstruálni lehet az áthaladó müonok pályáját. Egy ilyen struktúrát nyomkövetőnek, vagy tracker-nek hívnak. A Muon Camera-ban a tracker CCC-kből áll [9].

1.5. Szcintillációs detektorok

A szcintilláció fényvillanást jelent. Azokat az anyagokat nevezik szcintillátoranyagnak [13], amelyek ionizáló sugárzás hatására fényt bocsájtanak ki. A szcintillátorok [14] készülhetnek szerves vagy szervetlen kristályokból, de létezik szcintillációs folyadék is. Szcintilláció során az anyag elnyeli az áthaladó részecske által leadott energiát, majd (bizonyos hullámhosszú) fotonokként kisugározza. A folyamatban kevés foton keletkezik, ezeknek a mérhető, elektronikus jellé konvertálása általában fotoelektron-sokszorozóval történik.

A fotoelektron-sokszorozó cső (PhotoMultiplier Tube, PMT) egy nagyfeszültséggel működő, vákuumcsőből készült átalakító-erősítő. A PMT bemenetén egy negatív feszültségre kapcsolt alkálifém lap található. Emögött 10-15 darab dinóda van elhelyezve, egyre kisebb negatív feszültséggel. A legutolsó dinódán általában 0 volt feszültség van. Az alkálifém-lapnak nekiütköző foton fotoeffektussal elektronokat szakít le, majd az elektronok, az elektromos tér által gyorsítva, belecsapódnak a következő dinódába, ahonnan újabb elektronokat lökhetnek ki, amennyiben elég nagy energiára tettek szert. Az így kialakuló erősítés mértéke exponenciálisan függ a dinódák számától, tipikusan $10^5 - 10^7$ nagyságrendbe esik. Néha előfordul, hogy a legelső dinódát kapcsolják 0 volt feszültségre, és a legutolsót pedig nagy pozitív feszültségre. A jelet ebben az esetben kondenzátorokkal szokták lecsatolni. Ilyen szcintillátorokat vizsgáltam meg a 3.8. fejezetben. A sokszorozó érzékenysége miatt szokás a szcintillátorra árnyékoló bevonatot tenni, mivel a természetes fény közvetlenül a sokszorozóba jutva tönkreteheti azt. Az ilyen típusú összeállításban a PMT-csőből érkező jelek körülbelül 20-200 ns hosszúságúak [15] .

A szcintillációs detektorok felhasználása igen széles körű. A részecskefizikai méréseken kívül sugárzásmérésre is használhatók (szcintillációs számlálók). Számítógépes tomográfiánál, illetve pozitron emissziós tomográfiánál is ilyen típusú detektorokat alkalmaznak.

1.6. Motivácó

A Muon Camera [9] az első olyan kísérleti eszköz, ami azért épült, hogy műonok keltette másodlagos részecskéket használva alkosson képet kisméretű, akár alacsony rendszámú elemekből álló tárgyakról.

A képalkotó eljárás tökélesítéséhez nélkülözhetetlen a háttér precíz, spektrális ismerete, a jel/zaj arány maximalizálása, valamint a képélesség növelése a céltárgy pozíciójának és alakjának a meghatározásához. Különösen érdekes különböző anyagi minőségű céltárgyakban keletkező másodlagos részecskék spektrumának összehasonlítása. A dolgozatban ezeket a témaköröket vizsgálom mélyebben.

2. A MUCA kísérleti összeállítás bemutatása

2.1. Felépítés

A Muon Camera-t (MUCA) az Újvidéki Egyetem munkatársaival közösen építette meg a REGARD kutatócsoport [9]. Ez az eszköz négy szcintillátorból (1.5. fejezet) és egy Muon Trackerből (1.4. fejezet) gyűjti az adatokat. A 3. ábrán egy vázlatos rajz látszik a mérési összeállításról, a 4. ábrán pedig egy fotó.

A berendezés közepén található a mérőtérfogat, melynek dimenziói 54 cm × 54 cm × 50 cm. Ide helyezik a céltárgyat. A mérőtérfogatot vízszintesen körbeveszi 4 darab 50 cm × 50 cm × 5 cm-es plasztik szcintillátor. A mérőtérfogat felett helyezkedik el a müon tracker, ami 5 darab 25 cm × 25 cm-es közelkatódos kamrából áll, melyek helyfelbontása 2 mm.

A tartószerkezet a szcintillátorok belső oldalán helyezkedik el, így nem közvetlen egymást érintik a szcintillátorok, ezért nem pontosan $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ a mérőtérfogat.

A szcintillátorokból érkező jelek összegét és idejét egy CAEN digitalizáló rögzíti. A müon tracker adatgyűjtő központja a CAEN digitalizálótól függetlenül rögzíti az átmenő müonok helyét, a kamrákban leadott jel nagyságát, és az áthaladás időpontját. Az adatokat a 2.4. fejezetben leírtak szerint dolgozzuk fel.

A müon tracker és a szcintillátorok nem koincidenciában (együttesen) vannak kiolvasva, külön vannak triggerelve. A tracker minimum 3 CCC kamera megszólalása esetén menti el, hogy melyik szálról és parkettáról olvasta ki a jelet, a szcintillátorjeleket gyűjtő CAEN digitalizáló pedig minimum 5 adc egység esetén rögzíti a szcintillátorokból érkező jel összegét.



3. ábra. Vázlatos rajz a Muon Camera-ról. A fentről érkező müon áthalad a nyomkövető detektorrendszeren (a CCC-ken), a céltárgyban másodlagos részecskét kelt, ezt pedig a szcintillátorok detektálják. Két szcintillátor hiányzik a rajzról, hogy könnyebben értel-mezhető legyen.



4. ábra. Egy kép a mérőberendezésről. A narancssárga nyíl az egyik szcintillátorra, a zöld pedig a tracker-re mutat.

2.2. Lehetséges alkalmazások

Egy ilyen jellegű mérésnek a fő alkalmazási területe várhatóan az anyagvizsgálat lesz, kisebb kiterjedésű és rendszámú céltárgyak elemzését is lehetővé fogja tenni.

Azt várnánk, hogy különböző elemekre különböző a kozmikus müonok keltette másodlagos részecskék energia- és szögeloszlása (alumíniumra és ólomra lásd 3.7.), mivel az energialeadás is más. A müonok leadott energiája főként ionizációra fordítódik [7], azonban az így keltett elektronok többnyire nem jutnak el a szcintillátorokig, mivel a mérőtérfogatban lévő levegőben, esetleg a szcintillátor védőfelületén elnyelődnek. Az elektronok lassulásakor végbemenő fékezési sugárzáskor keletkező nagy energiás fotonok azonban már elérik a szcintillátorokat, ezért ezeket mérik a detektorok [9]. Mivel az említett folyamatok alacsonyabb rendszámú anyagoknál is végbemennek, ezért alacsony rendszámú anyagok vizsgálatát is lehetővé teszi, szemben a müonok szórásán [16], illetve abszorpcióján alapuló módszerekkel, amely folyamatok a rendszám nagyobb hatványaival arányosak. A minták vizsgálata roncsolásmentes, hiszen nincsenek kitéve semmilyen sugárzásnak a háttérsugárzáson kívül.

Ezt a nem invazív vizsgálati módszert lehet alkalmazni régészeti leletek elemzésére, vagy akár meteoritok vizsgálatára is.

2.3. Korábbi eredmények

Az Újvidéki Egyetem kutatói 2014-ben meghatározták a kozmikus müonok részecskekeltési hatáskeresztmetszetét kalcium-oxidban [17]. Ezek után a Regard kutatócsoporttal kollaborálva 2015-ben bizonyították egy réztárggyal, hogy lehetséges a képalkotás a kozmikus müonok keltette másodlagos részecskékkel [18]. 2016-ban pedig közösen megépítették a Muon Camera-t [9], kifejezetten képalkotásra a másodlagos részecskék felhasználásával (5. ábra). Bemutatták, hogy alumínium, csont, zsírszövet, vagy akár víz is látható ezzel az eszközzel [9]. 2020-ban Galgóczi Gábor GEANT4-es szimulációkkal megvizsgálta a müonok keltette másodlagos részecskék energia- és szögeloszlását [19] (lásd 6. ábra). Egy 10 cm × 10 cm × 0.5 cm-es ólomtárgyat sugárzott be 1 GeV energiájú, a tárgy legnagyobb lapjára merőlegesen beérkező müonokkal.



5. ábra. Néhány, a MUCA által alkotott kép (alul) különböző tárgyakról [9] . A képek szélei azért sötétek, mert egy szcintillátoron is áthaladó müon másodlagos részecskéit nem tudjuk mérni, ezért onnan nincsenek adatok. Az utolsó oszlopban a háttér látható. A nyíllal jelölt csíkot a trackeren lévő elektronikus zaj okozta.



6. ábra. A másodlagosok szögeloszlása és energiaspektruma szimuláció alapján, ólom céltárgyra.[19]

2.4. Adatok feldolgozása, képalkotó eljárás

A mérések eredményeinek megértéséhez először definiálnunk kell, hogy mi a jel. Jel alatt az olyan eseményeket értjük, amikor a céltárgyból érkező, kozmikus müon keltette másodlagos részecske mérhető energiát ad le az egyik szcintillátorban.

Egy ólom tégláról készített MUCA-kép látható a 7. ábrán. Az analízis során állíthatunk be alsó, illetve felső energia vágást a szcintillátorok jeleire, illetve szűrhetünk a müonok maximális zenitszögére is.



Másodlagos részecske keltési valószínűségek

7. ábra. Az adatok feldolgozása után egy ilyen képet kapunk a tárgyról. Ez egy 40 cm magasra helyezett ólomtégla képe.

A koincidencia triggerelés offline történik. A müon tracker által felvett eseményekhez keresünk azokkal egy időben (1 μ s időablakon belül) történő szcintillátoreseményeket. A párba állított adatokat megtartjuk, a többit zajnak tekintjük és eldobjuk. A CAEN kártya és a tracker időmérője nem ugyanolyan pontos (6 ppm a különbség), ezért a párosítások során ezt is figyelembe kell venni.

A tracker által felvett adatokra (x-y koordinátapárok, 3-5 darab különböző magasságú síkon; a müonnak a kamrákon való áthaladásának helyei) egyenest illesztünk a legkisebb négyzetek módszerével. Kiszámoljuk, hogy ezek az egyenesek hol metszik a céltárgy síkját (amit ismertnek tekintünk). A céltárgy síkját felosztjuk négyzetekre, majd minden egyes négyzetben megszámoljuk a müonbeütések számát, illetve azon események számát, amikor az adott négyzeten áthaladt egy müon, és tartozik hozzá szcintillátor jel is. Az utóbbit elosztva az előbbivel, megkapjuk az adott területre jellemző másodlagos részecske keltési valószínűséget egy kozmikus müon áthaladására. A kapott eredmények nem a pontos értékek, hiszen ezeken torzít a szcintillátorok detektálási hatásfoka, a háttér, elnyelődés a levegőben, meg természetesen az is, hogy az mért objektumnak függőleges kiterjedése is van, nem csak az általunk kiválasztott síkban keltődhetnek másodlagos részecskék.

2.5. Tervezett kísérleti fejlesztések

A szimulációk alapján (6. ábra) látszik, hogy a keletkező másodlagos részecskék jelentős része előre szóródik. A 3. fejezet alapján is hasonló következtetésekre juthatunk. Ezért érdemes lehet az előre szóródó részecskéket is detektálni.

Az előre szórt részecskék detektálásánál azonban problémába ütközünk: a müon is át fog haladni azon a szcintillátoron, amit a mérőtérfogat alá helyezünk, ami így mindig a két energia összegét fogja mérni.

Ezt a problémát a még épülő COMIS (COsmic Muon Induced Secondaries) rendszerben úgy fogjuk megoldani, hogy 4 kisebb (25 cm \times 25 cm) szcintillátort helyezünk a mérőtérfogat alá, így az előre szóródó másodlagos részecskék egy részét is fogjuk tudni mérni. A struktúrát részletesebben a Kitekintésben (5. fejezet) mutatom be.

3. Eredmények

Az eddigi mérések és szimulációk igazolták, hogy a Muon Camera képes roncsolásmentes leképezésre, azonban ennek kvantitatív vizsgálata és a képalkotó eljárás finomítása nélkülözhetetlen egy alkalmazásszintű rendszer kiépítéséhez.

Munkámnak a két legfontosabb része a mért adatok szimulációval való összevetése, illetve különböző anyagok összehasonlítása volt. Ezek elvégzéséhez meg kellett határoznom a hátteret (3.1. fejezet), a jel maximalizálásával (3.2. fejezet) pedig a rendelkezésemre álló statisztikát növeltem. Megvizsgáltam a tárgykép mélységélességét (3.3) és az elérhető képélességet (3.4). A szcintillátorok energiakalibrációja (3.5. fejezet). és a szimulációval való összevetés (3.6) után vizsgáltam az alumínium és ólom céltárgyak jelerősségét (3.7).

3.1. Háttér meghatározása

A jelentős háttér pontos és spektrális ismerete elengedhetetlen a szimulációval való összehasonlításhoz, amit a 3.6. fejezetben be is mutatok.

A szcintillátorokon megjelenő energiaérték nem feltétlenül egy általunk mérni kívánt másodlagos részecskéhez tartozik, háttéresemény is lehet. Háttéreseménynek azt nevezzük, amikor egy olyan másodlagos részecskét mérünk, ami akkor is keltődne, hogyha nincs jelen a céltárgy, vagy másodlagos részecske mérésének tűnik az esemény, de nem az. Ezt sok minden okozhatja. Előfordulhat, hogy amikor áthalad egy müon a trackeren, közben egy másik áthalad valamelyik szcintillátor szélén (másodlagos részecskének nézhet ki). A müon valamekkora valószínűséggel a levegő atomjain is kelthet részecskéket, vagy akár spontán bomolhat is (nincs jelen a céltárgy). A műszereken is lehet elektronikus zaj, ami szintén okozhat háttéreseményeket. Egyéb fizika folyamatok is hozzájárulhatnak a háttérhez, például egy közeli anyagból, vagy a levegőben lévő radioaktív atomok bomlásából származó sugárzás.

Ezek az események a műszerre, a mérésre jellemzők, torzítják a céltárgyról kapott adatokat, zajnak tekintendők. Érdemes tehát meghatározni a háttéreseményeket, hiszen ezeket a mért adatokból kivonva közelítőleg megkapjuk a jelnek tekinthető események számát.

Háromféle hátteret definiáltam, ezek a 8. és 9. ábrákon láthatóak. Az események számát, leosztva a müonok számával, ábrázoltam a szcintillátorokon lévő jelnagyság függvényében. A lila és a zöld hisztogramokon egy olyan mérésből származó adatokat ábrázoltam, amikor a mérési összeállítás belseje üres volt (csak a tartószerkezet volt benne). A piros és a sárga hisztogramok pedig egy olyan mérésből származnak, amikor 30 cm magasságban egy ólomtéglát helyeztek a mérőtérfogat közepére. A piros hisztogram a céltárgyból érkező validált másodlagosokat mutatja, ez referenciának van az ábrán. Az ábra elkészítéséhez definiálnom kellett két tartományt, a céltárgy belsejét, illetve a céltárgyon kívüli részt. A "céltárgy belseje" tartományon azok a müonok haladtak át, amelyek 30 cm magasságban áthaladtak (volna) a tárgyon. A "céltárgyon kívüli" tartomány az ezen kívüli rész, viszont a tárgy széleinek közeli környezete egyik tartományhoz se tartozik, mivel folytonos az átmenet a két tartomány között, és nem egyértelmű a határ. A kétféle tartományt a 10 ábra szemlélteti.



8. ábra. Különböző módon definiált hátterek spektruma.



9. ábra. Hátterek logaritmikus skálán.



Másodlagos részecske keltési valószínűségek

10. ábra. A belső tartomány a zöld terület, a külső pedig a piros. A zöld tartomány azért ilyen kicsi, hogy akkor is biztosan a céltárgyon belül legyen, ha esetleg az egy kicsit arrébb kerülne.

A 8. és a 9. ábrák alapján a jel-zaj különbség 6 és 120 adc között a legnagyobb. Ez energiában 120 és 2400 keV között van (lásd 3.5 fejezet). Tehát ezt a tartományt mindenképpen érdemes megtartani a vágásoknál. Jól látható továbbá, hogy a háromféle háttér spektruma megegyezik. A sárga hisztogramnak a legsimább az alakja, (mivel ennél volt a legnagyobb a statisztika,) és ez a legkevésbé érzékeny a berendezés változtatására, ezért a továbbiakban ennek a definícióját használtam (a céltárgy mérésekor a céltárgyon kívüli területen a másodlagos részecske keltési ráta). Ezt a hisztogrammot felösszegezve, majd leosztva a háttértartományon áthaladt müonok számával, a háttéresemények valószínűsége (6.7 ± 0.1) %-nak bizonyult, tehát egy müon áthaladásakor ekkora valószínűséggel mérünk háttéreseményt.

3.2. Jel maximalizálása

A jelet azért érdemes maximalizálni, mert akkor nagyobb statisztikánk lesz, kisebbek lesznek a hibák.

Miután meghatároztuk a hátteret, a következő fontos lépés a jelnagyság meghatározása a vágások függvényében, illetve annak maximalizálása. Minél nagyobb valószínűséggel detektálunk másodlagos részecskét egy müon áthaladásakor, annál több az adat, tehát pontosabb a mérés. Más szóval, kevesebb ideig kell mérni, hogy ugyanannyi adatot gyűjtsünk.



11. ábra. Alsó energia vágások



12. ábra. Felső energia vágások

A 11. és a 12. ábrák alapján arra lehet következtetni, hogy nem érdemes vágást tenni az adatokra, hiszen a jel akkor lesz maximális. Azonban ez nem teljesen igaz, egy

felső vágásnak van értelme, ugyanis, ha megnézzük a 8. ábrát, akkor nagy energiáknál a másodlagos keltési ráta kisebb, mint kis energiákon. Tehát a nagy energiás jeleknek (> 100 adc) alacsony a járuléka az összbeütésszámhoz. Még azt is érdemes megemlíteni, hogy 200 adc jel felett gyakran előfordul, hogy 0 beütés érkezik a tárgyból a 25 órán át tartó mérés során (4 adc-s binmérettel, ami 80 keV-nak felel meg), tehát a másodlagos részecskék energiaspektrumát nem lehet meghatározni ezen energiatartomány felett ilyen pontossággal. Ez a statisztikus hibából ered, ami pedig azért ilyen nagy, mert alacsony az eseményszám ekkora energiáknál.

Tehát, amennyiben a másodlagos részecskék energiaspektrumát szeretnénk meghatározni, a felső vágást érdemes 200 adc jelhez rakni; amennyiben csak azt szeretnénk megtudni, hogy a céltárgyban átlagosan mennyi másodlagos részecskét kelt egy müon áthaladáskor, akkor érdemes minél magasabbra (600 adc) helyezni. Alsó vágás hardveresen 5 adc jelnél van, ennél lejjebb nem lehet rakni.

3.3. Céltárgy függőleges helyzetének meghatározása

A céltárgy koordinátáinak meghatározása egy ellenőrzési módszer arra, hogy megfelelően dolgozzuk-e fel az adatokat, hiszen ez méréskor (szinte) mindig ismert lesz. Előfordulhat a későbbiekben olyan eset is, hogy egy tárgy belsejében egy pont körül nagyobb koncentrációban található valamilyen anyag (például érc egy meteoritban), így ekkor is alkalmazható lehet az ebben a fejezetben bemutatott eljárás.

A képalkotó eljárás során különböző magasságokra állítottam be a tárgymagasságot, és ábrázoltam az x és y tengely mentén, hogy milyen valószínűséggel érkezik az adott koordinátapont környezetéből másodlagos részecske. Ezt ábrázoltam a 13. és 14. ábrákon. Az ólom céltárgy tényleges magassága 300 mm volt a mérés során.



13. ábra. Az x tengely mentén a 10. ábra a céltárgy tartományának bal és jobb oldala által meghatározott egyenesek között összegeztem a validált másodlagos részecske beütések számát, majd leosztottam a validált müonbeütések számának összegével. Ezek után kivontam a 6.7%-os hátteret.



14. ábra. y mentén a 13. ábrával analóg módon számoltam ki a másodlagos keltési rátát.

A 14. ábrán, a 300 mm magassághoz tartozó, narancssárga négyzettel jelölt grafikonon egyértelműen látszik, hogy nem egy, hanem kettő csúcsa van. Az ólomtárgy belsejéből kisebb valószínűséggel jut ki egy másodlagos részecske, mint a felszín közeléből, ugyanis az előbbi esetben nagyobb eséllyel nyelődik el az anyagban. Ezért tehát, a céltárgy széleinél nagyobb lesz a másodlagos keltési ráta, hiszen a felületi effektusok nagyobb mértékben növelik azt, mint a tárgy közepén.

Ezek után ábrázoltam a különböző magasságokhoz tartozó csúcsok szélességét a beállított tárgymagasság függvényében, ez a 15. ábrán látható. A csúcsok végpontjai azok a koordinátapontok, amikor a csúcs maximumától távolodva (egyik, illetve másik irányba) a másodlagos keltési ráta először esik 0.3% alá.



15. ábra. Mindkét projekció esetén 300 mm-hez közel van a minimum, ami megegyezik a céltárgy tényleges magasságával.

3.4. Elmosódás- a beérkező müonok szögének maximuma

A céltárgy képét a tárgysíkra vetített müon-nyomokkal határozzuk meg, így a nagyobb szögben beérkező müonok esetén a céltárgy képe egyre jobban elmosódik vastag céltárgyak esetén. Amennyiben csak kis beesési szögeket engedünk meg, a mérés statisztikáját rontjuk, így a praktikus optimum vizsgálandó.

Megvizsgáltam, hogy a beérkező müonok szögének maximuma hogyan befolyásolja a másodlagos részecske keltési rátát, pontosabban a tárgy látszólagos szélességét. A 16., illetve a 17. ábrán láthatóak a másodlagos részecske keltési ráták, különböző maximum müonszögek esetén. Az integrálás során a 3.3. fejezet 13. ábra leírásában megtalálható módon jártam el.



16. ábra. A 16.7°-os és a 26.57°-os maximumhoz tartozó görbék szinte teljesen azonosak. Az 5.71°-os maximum görbéjének nagy a hibája, a kevés beütésszám miatt.



Y mentén integrált másodlagos részecske keltési ráta

17. ábra. Itt is megjelent a tárgy szélén a két csúcs, a 14. ábrához hasonlóan.

A 16. és a 17. ábrákon látszik, hogy a tárgy látszólagos szélessége nem függ jelentős mértékben a beérkező műonok szögének maximumától. Ezt a maximumot tehát jelen mérési elrendezésben érdemes minél nagyobbra venni, a mérési pontosság növelésének érdekében. 26.57° felett viszonylag kevés validált műon fog érkezni, a műonok cos²-es eloszlása miatt, és a a berendezés méreteiből kifolyólag. Maximum körülbelül 35°-ban érkező műon haladhat át a trackeren és a mérőtérfogaton úgy, hogy nem metszi a pályája a szcintillátorokat.

Az effektust vastagabb céltárggyal, illetve nagyobb kiterjedésű nyomkövető detektorrendszerrel lehet jobban megfigyelni, amikoris az optimum véges vágást kívánhat meg.

3.5. Energiakalibráció

A szimulációval való összevetéshez (3.6. fejezet) szükséges meghatározni, hogy a szcintillátorokból érkező digitális jel (adc) mekkora energiának felel meg. Ezt általában egy ismert energiájú sugárzás mérésével szokták elvégezni, de mivel nem állt rendelkezésre a mérések során optimális forrás, ezért szimulációs adatokkal végeztem a kalibrációt (18. ábra).



18. ábra. Szimuláció és mérés energiaeloszlás-hisztogramja egymásra illesztve. Ez alapján 1 adc egység körülbelül 20 keV-nak felel meg.

Ez a módszer csak nagyságrendi becslésnek elegendő, hiszen a szimulációból kapott értékek valószínűleg nem egyeznek meg teljes mértékben a valósakkal, és az illesztés is szemmel történt.

A mérés egy 40 cm magasra helyezett ólomtárggyal történt, egy napig tartott az adatgyűjtés. Az analízis során a müonszögek maximuma 26.6° volt, illetve az összes másodlagos részecskét tartalmazza a spektrum, nem csak a céltárgyból érkezőket.

A szimulációs adatokat Geant4-ben készítette Galgóczi Gábor, hasonlóan a [19] hivatkozáshoz. 10000 müont lőtt egy 10 cm \times 10 cm \times 5 cm-es ólomhasábra, majd elmentette mindegyik, a céltárgyból kijutó elektronnak és fotonnak az energiáját, illetve az irányát. A mérés geometriájának megfelelő szögtartományban kilépő másodlagos részecskék energiájának elkészítettem az energiaspektrumát. A szcintillátorok hatásfokát csak később, az energiakalibráció felhasználásával tudtam meghatározni (lásd 3.6), így ezzel nem súlyoztam az eloszlást.

3.6. Összevetés szimulációval

Az összehasonlításhoz szükséges a szcintillátorok detektálási hatásfokát is megvizsgálni, hiszen a tényleges mérésben ez is csökkenti a detektált másodlagosok számát.

A szcintillátorok hatásfokát is szimuláció alapján becsültem. A szimulációban Galgóczi Gábor különböző energiájú gamma fotonokat lőtt a mérésben használt szcintillátor paramétereivel megegyező szcintillátorra, és megszámolta, eseményenként mennyi detektálódik a szcintillátorban keltett fotonokból. Megnéztem, hogy különböző minimum fotonszámokhoz mekkora detektálási valószínűségek tartoznak, ez a 19. ábrán látható.



19. ábra. 400 keV felett egymáshoz közeli értékeket vesznek fel a görbék. Látszik, hogy a detektálási hatásfok függ az energiától.

A detektálási hatásfok mellett még fontos, a mérést jellemző mennyiség a geometriai hatásfok. Ezt a jelenlegi méréshez úgy definiálhatjuk, hogy a mérőtérfogat közepéből, vízszintesen egy véletlenszerű irányban elinduló foton ekkora valószínűséggel halad át egy szcintillátoron. Ez a 2.1. fejezetben közölt geometriai paraméterek alapján 0.84-nek adódik.

A hatásfok az előbb említetteken kívül függhet a gamma fotonok beérkezési, helyétől, amit részletesebben a 3.8. fejezetben vizsgálok meg. Ezt a függést jelen számítás során azonban elhanyagoltam.

A 3.5. fejezetben ismertetett szimulációs adatokat vetettem össze az ólom céltárgy különböző magasságokba helyezett mérésével. A szimulációs adatokat úgy dolgoztam fel, hogy a 100 keV-nél nagyobb, a MUCA geometriájának megfelelő térszögtartományban kilépő fotonokat megszoroztam az energiájukhoz tartozó detektálási hatásfokkal, majd összegeztem ezeket a számokat, és osztottam az összesen belőtt müonszámmal. A detektálási hatásfokhoz a minimum 3 fotonhoz tartozó görbét (19. ábra) használtam fel. A pontok között lineárisan interpoláltam, a nagyobb mint 1000 keV energiájú másodlagos részecskék detektálási hatásfokát pedig 0.7-nek vettem. Az így feldolgozott adatokat már össze lehetett vetni a mérési eredményekkel. Ez a 20. ábrán látható. A két görbe azonos tendenciát mutat, tehát a szimuláció jól közelítette a tényleges mérést, ami rendkívüli eredmény, hiszen korábban még nem végeztek ilyen jellegű mérésben összehasonlítást. Az ábrán még azt is észre lehet venni, hogy minél feljebb helyezzük a céltárgyat, annál több másodlagos részecskét tudunk érzékelni, tehát a nagy sebességű müonok több részecskét szórnak előre, mint oldalirányba, ahogy azt várnánk. Ennek a szemléltetése a 21. ábrán látható. A két görbe csak nagyságrendileg egyezik, ezt három dolog is okozhatja. Az egyik az energiakalibráció, ami valószínűleg nem pontos, csak nagyságrendileg megfelelő, hiszen az energiaspektrumok jellegéből adódóan (exponenciális eloszláshoz hasonló) nem volt egyértelmű az illesztés. A szimuláció során a céltárgyba csak merőlegesen érkeztek a müonok, ami szintén torzított az összehasonlításon, mert az analízishez a 26.6 fokban érkezőket is felhasználtam, hogy elegendő adat legyen. A legjelentősebb torzítást viszont az okozta, hogy a szimulációban csak fix energiájú müonok voltak, míg a valós kozmikus spektrum igen széles [1].



20. ábra. Az egyszerűsített szimuláció a mérésekkel azonos tendenciát jósol, körülbelül csak 2-es faktorral térnek el.

Alumíniumnál és ólomnál is növekvő tendenciát mutat a magasság függvényében a detektált másodlagosok száma ezen a tartományon. Alumíniumnál nem tudtam egyértelműen meghatározni a hátteret, ezért az ólomhoz tartozót vontam ki a rátákból, mivel mindkét esetben a háttéresemények a külső tartományokban keltődnek, ami mindkét mérésnél megegyezett. A 22. ábráról leolvasható, hogy alumíniumban sokkal kisebb a másodlagos részecske keltési valószínűség, mint ólomban.



21. ábra. A céltárgy magassága határozza meg, hogy milyen szögtartományban szóródó részecskéket detektálunk.



22. ábra. Alumínium és ólom másodlagos részecske keltési valószínűsége a magasság függvényében.

3.7. Különböző anyagok összehasonlítasa

A kozmikus müonok keltette másodlagos részecskéket anyagmeghatározásra lehet majd felhasználni, ezért különösen fontos a különböző anyagok energiaspektrumának vizsgálata.

Alumínium és ólom céltárgyak keltette másodlagos részecskék energiaspektrumát, illetve a keltett részecskék szögfüggését hasonlítottam össze. Azért éppen ezt a két elemet, mert elég nagy a különbség a rendszámaik (13 és 82) között, tehát a másodlagos részecske keltési valószínűségekben is nagyobb különbségeket várunk.

A másodlagos keltési ráta helyfüggését olyan mérések alapján készítettem, ahol az alumínium és a az ólom céltárgy is 40 cm magasan volt. Ezek a 23. és a 24. ábrákon láthatók. Az ólomtárgy vetülete jól kivehető az ábráról, az alumíniumtárgyé nem. Alumíniumból jelentősen kevesebb másodlagos részecskét detektáltunk, mint ólomból, ezért nehezebb elkülöníteni a háttértől. Az alumínium jóval alacsonyabb rendszámú, mint az ólom, ezért kevesebb gamma foton keletkezik. A szimulációs várakozások szerint a keltett elektronok száma nő, viszont nem olyan mértékben, hogy ellensúlyozza a fotonszám-csökkenést. Az elektronok ráadásul jóval kisebb eséllyel jutnak el a szcintillátorokig, mint a fotonok.



23. ábra. Ólom másodlagos keltési ráta térképe. A ólomtégla képe jól látható.



24. ábra. Alumínium másodlagos keltési ráta térképe. Szabad szemmel nem kivehető a céltárgy vetülete, mivel alumíniumban kevesebb másodlagos keletkezik, mint az ólom céltárgyban, így nem válik olyan szépen el a háttértől.



25. ábra. Alumínium és ólom spektruma, háttérrel együtt.

A mért energiaspektrumokat a 25. ábra szemlélteti. Látható, hogy az alumíniumban keltett másodlagosok száma kevés, de határozottan elválik a háttértől. A kétféle céltárgyból a spektrumok eltérőek, a valódi jel vizsgálatához szükséges kivonni a korábban meghatározott hátteret (8. ábra).

Háttérlevonás után kapható a másodlagos részecskék energiaspektruma, ami a 26 ábrán látható. A két spektrum szignifikánsan különbözik, egymásba nem átskálázhatóak. Ez főként alacsony energiákon látszik, ugyanis az ólom spektruma viszonylag gyorsan csökken, míg az alumíniumé lassabban változik. Ezzel bebizonyítottam, hogy detektálható spektrális eltérés, ami igazolja a Muon Camera roncsolásmentes anyagmeghatározási potenciálját. Többféle elem másodlagos részecske spektrumának megmérésével egy ismeretlen minta anyagösszetételét is meg lehet határozni.



26. ábra. Alumínium és ólom spektruma, háttérlevonással.

3.8. Szcintillátorok hatásfoktérképe

A szcintillátorokon áthaladó részecskék detektálási hatásfokát a szimulációval való összehasonlítás során (3.6 fejezet) konstansnak tekintettem, ami nem feltétlenül igaz.

Megvizsgáltam, hogy 25 cm \times 25 cm-es és 50 cm \times 50 cm-es plasztik szcintillációs detektorok hatásfoka mennyire, illetve hogyan függ a beérkező részecske áthaladási helyétől. A mérések során elhelyeztem egy szcintillátort a Regard csoport egyik laborjának az asztalára, az asztal alá pedig egy 5 közelkatódos kamrából (lásd 1.4. fejezet) álló tracking rendszert. Így a szcintillátorokon áthaladó kozmikus müonok jelét koincidenciában kiolvasva a trackinggel, meg tudtam határozni, hogy a szcintillátor melyik pontján haladt át a müon, illetve mekkora energiát (adc egységekben) adott le. Egy területen a minimális energiánál nagyobb beütések számát elosztva a területen áthaladó müonok számával megkapható a területre jellemző detektálási hatásfok. Egy ilyen módon készített térkép látható a 27. ábrán.



27. ábra. Egy új 50×50 cm²-es szcintillátor hatásfoktérképe. A felület nagyrészt homogén, míg a PMT melletti rész jobb, a sarkok gyengébbek.

A 27. ábra alapján a szcintillátort három különböző tartományra lehet bontani. Az egyik egy nagyobb detektálási hatásfokkal rendelkező, ami közel van a PMT-hez (lásd 1.5. fejezet), a másik egy viszonylag nagy, konstansnak tekinthető tartomány, a harmadik pedig a két felső sarka a szcintillátornak.

A nagy detektálási hatásfokú tartomány azért alakul ki, mert közelebb van PMT-hez, ami elektronná konvertálja a keletkező fotonokat. Ez két okból jelent hatásfok növekedést.

Az egyik az, hogy közelről nagyobb térszögben látszik a PMT ablaka, így az egyenletes szögeloszlással keltett fotonok nagyobb valószínűséggel érkeznek oda. A másik pedig az, hogy kevesebb utat kell megtennie a fotonoknak, így kisebb az elnyelődés esélye.

A PMT oldalán lévő két sarokban pedig azért olyan kicsi a detektálási hatásfok, mert onnan a PMT ablaka nagyon kis szögben látszik, ezért az oda eljutó fotonok tipikusan a detektor alsó oldaláról visszaverődve jutnak oda, és az úthossznövekedés miatt nő az elnyelődés esélye.

4. Konklúzió

Az Újvidéki Egyetemen működő Muon Camera egy olyan mérőberendezés, ami a kozmikus müonok által keltett részecskék detektálásával szerez információt arról a tárgyról, amelyen a müonok áthaladtak. Ezen újszerű kutatási területen a Muon Camera a világ első ilyen kísérleti berendezése.

A Muon Camera közepén lévő mérőtérfogatba helyezhető el a vizsgálandó tárgy. A mérőtérfogat négy oldalán nagy méretű plasztik szcintillációs detektorok vannak elhelyezve, felette pedig egy sokszálas nyomkövető detektorrendszer található. A müon áthalad a nyomkövetőn, amivel meg tudjuk határozni a pályáját, majd a céltárgyon áthaladva másodlagos részecskéket kelt, amik eljuthatnak a szcintillátorokhoz ahol megmérjük az energiájukat. Ezen információ alapján pozíciófüggően kiszámítható a keltett részecskék spektruma, amiből következtethetünk a céltárgy anyagi minőségére. Ez egy új roncsolásmentes képalkotási mód, ami a másodlagos spektrumok ismeretében anyagmeghatározásra is használható lehet.

Munkám során a kozmikus müonok keltette másodlagos részecskék energia- és szögeloszlását vizsgáltam. Az ólom céltárggyal történt méréseket egy viszonylag egyszerű szimulációval is összevetettem, amik hasonló tendenciát mutattak, csak egy kettes faktor különbség volt köztük. Ezekhez az eredményekhez előbb meg kellett határoznom a Muon Camera háttérzaját, illetve ennek a spektrumát, a jel/zaj arányt maximalizálni és elvégezni a szcintillátorok energiakalibrációját. A háromdimenziós képalkotás első lépéseként megvizsgáltam a rendszer mélységélesség felbontását. Összeállítottam egy speciális mérési elrendezést amiben a szcintillátorok hatásfoktérképét kimértem, amely szükséges a realisztikus szimulációk előkészítéséhez. Ólom és alumínium céltárgyakat összehasonlítva bebizonyítottam, hogy detektálható spektrális eltérés, ami igazolja a Muon Camera roncsolásmentes anyagmeghatározási potenciálját.

5. Kitekintés

A különböző anyagi minőségű objektumok vizsgálatát kísérletileg a Muon Camera-val való szisztematikus mérések sorozatával fogjuk megvalósítani a szerb kollégákkal együttműködve.

A REGARD kutatócsoportban a korábbi eredmények alapján elkezdtünk dolgozni a detektorrendszer továbbfejlesztésén COMIS (COsmic Muon Induced Secondaries) néven, ami része az elnyert OTKA pályázatnak (FK135349). Az új rendszert a WignerFK laboratóriumban fejlesztjük és építjük, majd a Novi Sad Egyetem rendszerén is implementáljuk. Nagyobb méretű nyomketőkkel rövidül a mérési idő és a szélesebb szögtartomány segítségével javítható a mélységélesség. A másodlagos részecskék jelentős hányada az előreszórási régióba esik, amelyek a mérőtérfogat alatt elhelyezendő négy darab 25 cm × 25 cm-es szcintillátorban detektálódnak. Tervezzük továbbá egy olyan gáztöltésű detektor behelyezését a rendszerbe, amellyel megkülönböztethetőek lesznek a másodlagos elektronok és a fotonok. Az adatgyűjtés a COMIS méréssel úgy fog történni, hogy a tracker fogja triggerelni szcintillátorokból érkező jelek kigyűjtését is, így nem lesz szükség az adatok offline összepárosítására, csökkentve ezzel a rögzített felesleges adatok mennyiségét. Természetesen a GEANT4-es szimuláció fejlesztése is elkezdődött, fix energiás müonok helyett a kozmikus spektrumból mintavételezett energiájú müonok lesznek használva.

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Hamar Gergőnek a rengeteg rám szánt idejét és a sok tudást, amit átadott. Köszönettel tartozok Galgóczi Gábornak is a szimulációs adatok elkészítéséért. A REGARD kutatócsoportnak és az Újvidéki Egyetem kutatóinak köszönöm, hogy rendelkezésemre bocsájtották a Muon Camera-val készült mérési adatokat. A REGARD kutatócsoport összes tagjának köszönöm a támogatását, valamint a Wigner Fizika Kutatóközpontnak a laboratóriumi hátteret. A kutatást az OTKA FK-135349 pályázata támogatta.

Hivatkozások

- [1] URL: https://www.hap-astroparticle.org/184.php.
- [2] Bektasoglu, M. és tsai. "Investigation of the zenith angle dependence of cosmic-ray muons at sea level". Pramana 80.5 (2013), 837–846. old.
- [3] Blum, W. és tsai. <u>Particle detection with drift chambers</u>. Springer Science & Business Media, 2008.
- [4] Alvarez, L. W. és tsai. "Search for Hidden Chambers in the Pyramids". <u>Science</u> 167.3919 (1970), 832–839. old. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.167.3919.
 832.
- [5] Malmqvist, L. és tsai. "Theoretical studies of in-situ rock density determinations using underground cosmic-ray muon intensity measurements with application in mining geophysics". <u>GEOPHYSICS</u> 44.9 (1979), 1549–1569. old. DOI: 10.1190/1. 1441026.
- [6] Tanaka, H. K. M. és tsai. "Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): First results from measurements at Asama volcano, Japan". Geophysical Research Letters 36.17 (2009).
- Bogdanov, A. G. és tsai. "Geant4 simulation of production and interaction of muons". <u>IEEE Transactions on Nuclear Science</u> 53.2 (2006), 513–519. old. DOI: 10.1109/ TNS.2006.872633.
- [8] Jackson, J. D. Classical electrodynamics. John Wiley & Sons, 2007.
- [9] Mrdja, D. és tsai. "First cosmic-ray images of bone and soft tissue". <u>EPL</u> 116.4 (2016), 48003. old. DOI: 10.1209/0295-5075/116/48003.
- [10] Varga, D. és tsai. "Asymmetric Multi-Wire Proportional Chamber with reduced requirements to mechanical precision". <u>Nuclear Instruments and Methods</u> 648.1 (2011), 163–167. old. ISSN: 0168-9002.
- [11] Charpak, G. és tsai. "The Use of Multiwire Proportional Counters to Select and Localize Charged Particles". Nucl. Instrum. Meth. 62 (1968), 262–268. old.
- [12] Varga, D. és tsai. "CCC: low material budget MWPC". <u>Nuclear Instruments and Methods</u> 698 (2013), 11–18. old.
- [13] Blasse, G. "Scintillator materials". Chemistry of Materials 6.9 (1994), 1465–1475. old.
- [14] Birks, J. B. The theory and practice of scintillation counting. 27. köt. Elsevier, 2013.
- [15] Bengtson, B. és tsai. "Timing properties of scintillation counters"". Nuclear Instruments and Methods 81.1 (1970), 109–120. old.
- [16] Pesente, S. és tsai. "First results on material identification and imaging with a largevolume muon tomography prototype". <u>Nuclear Instruments and Methods</u> 604.3 (2009), 738–746. old.

- [17] Bikit, K. és tsai. "Investigation of cosmic-ray muon induced processes by the MI-REDO facility". Applied Radiation and Isotopes 87 (2014), 77–80. old.
- [18] Bikit, I. és tsai. "Novel approach to imaging by cosmic-ray muons". <u>EPL</u> 113.5 (2016), 58001. old. DOI: 10.1209/0295-5075/113/58001.
- [19] Galgóczi, G. és tsai. "Imaging by muons and their induced secondary particles—a novel technique". Journal of Instrumentation 15.06 (2020), C06014. old.