

Kozmikus részecskék és anyag kölcsönhatása vulkánoktól műholdakig

Doktori Tézisfüzet

Galgóczi Gábor
Wigner Fizikai Kutatóközpont

ELTE Fizika Doktori Iskola
Vezető: Dr. Jenő Gubicza
Részecskefizika és Atommagfizika
Vezető: Dr. Zoltán Trócsányi

Témavezető:
dr. Varga Dezső
Tudományos Főmunkatárs
Wigner Fizikai Kutatóközpont

DOI-azonosító:
10.15476/ELTE.2023.169
Budapest, 2023.06.27.

1. Bevezetés

A mikroelektronikai ipar robbanásszerű fejlődése napjainkra új lehetőségeket nyitott a részecskefizikában. Lehetővé vált olyan kis méretű, megfizethető és pontos elektronikák megépítése, melyekkel megépíthető egy kicsi műholdban (~ 1 kg) egy részecskefizikai laboratórium. Illetve példának okáért olyan detektorrendszerek is megépíthetővé váltak, melyekkel egy vulkán belsejében történő folyamatokat tudunk vizsgálni kozmikus részecskék segítségével. Doktori munkámban tanulmányoztam mindkettő alkalmazást.

Az ötlet, hogy kozmikus részecskéket használjunk fel a nagy méretű objektumok (vulkánok, bányák) vizsgálatára nem új keletű. Luis Alvarez az 1960-as években bebizonyította, hogy a felső légkörből érkező müonok segítségével feltérképezhető a Gizai nagy piramis belső felépítése. A piramis alatti üregbe egy részecske-detektort helyeztek, mellyel megmérték mennyi kozmikus eredetű müonot látnak az egyes irányokba. Ez után kiszámították, hogy mennyit kellene látniuk, ha a piramis tömör lenne. A kettő különbségéből meg tudták határozni, hogy milyen irányban lehetnek üregek a piramisban.

Épületek mellett vulkánokat és azok belső szerkezetét is vizsgálhatjuk müonokkal. A fő cél ez esetben a vulkán belső sűrűségeloszlás változásának monitorozása. Ezért ez egy sokkal nehezebb feladat, hiszen néhány óránként kell egy pillanatképet készítenünk a vulkánról. (A piramisoknál ahol akár egy évig is lehet adatot gyűjteni.) A jelenleg vulkánt monitorozó legnagyobb detektorrendszer Sakurajimánál, Japánban működik. A detektorrendszer teljes mérete hozzávetőlegesen 10 m^2 . A detektorokat ehhez a rendszerhez a Wigner FK fejlesztette ki és a Tokiói Egyetem működteti őket.

A detektorrendszer megfizethető, nagy Sokszálas Proporciónális Kamrákat használ a töltött részecskék nyomon követésére. A kamrák között pedig tipikusan 10 cm ólom helyezkedik el több rétegben, amellyel a háttérrel jelentő részecskék nagy részét kiszűrjük a detektorrendszerből. Azonban a szimulációk megmutatták, hogy léteznek olyan közepes energiájú müonok, melyeket a fent említett módszer nem tud kiszűrni és ezért háttérrel jelentenek. Ennek a háttérnek a szoftveres elnyomására az eddigiekben "klasszikus" (egyenes illesztésen alapuló) nyomkövető algoritmust használnak. Dolgozatomban gépi tanulás segítségével vizsgáltam, hogy a jel-zaj arány javítható-e. Ez azért rendkívül fontos, mert a vulkán releváns részei 1-2 km-nyi kőzet alatt találhatóak, amin a müonok egy töredéke jut csak át, ezért alacsony a mérésben a jel nagysága.

A kozmikus sugárzás mérése a részecske-asztrófizikában a legfontosabb eszköz a nagyenergiájú világegyetem megismerésének. Az elmúlt években megmért körülbelül 100 gravitációs hullám a nagyenergiájú asztrófizika reneszánszhoz vezetett, ugyanis ez egy új ablakot nyitott világegyetemünkre.

Továbbá egy teljesen új tudományterületet, a sokcsatornás asztrofizikát teremtette meg. Ennek lényege, hogy ugyanazt az objektumot megfigyelik gravitációs hullámok, látható hullámhosszú fotonok és gamma-sugarak segítségével. Ezek közül az utóbbit rendkívül nehéz megfigyelni, ugyanis a Föld légköre kiszűri a gamma-fotonokat, ezért csak műholdakkal lehetséges a vizsgálatuk. Továbbá természetüknél fogva nehezen fókuszálhatóak, ezért nehéz feladat annak meghatározása, hogy milyen irányból érkeztek.

Az elmúlt években több új magánpiaci szereplő jelent meg a műholdak világűrbe feljuttatásának piacán. Ez egy új űrversenyt indított el, melynek köszönhetően rendkívüli mértékben leestek az árak egy nanoműhold pályára állítása kapcsán, több millió dollár helyett már körülbelül 100 000 \$-ért is pályára lehet állítani egy műholdat. Ezt a lehetőséget több kutatócsoport is kihasználja, számos egyetem és állami szervezet fejleszt tudományos nanoműholdakat, többek között γ -részecskék mérésére. Várhatóan ezen műholdak, melyek a nagyenergiájú világegyetemet vizsgálják, képesek lesznek háromszögelést használni, amellyel az eddigieknél sokkal pontosabb iránymeghatározást érhetnek el. Ezen műholdak kis mérete több kihívást is rejt magában. Kis méretükből adódóan ki vannak téve az alacsony Föld körüli pályán található rengeteg töltött részecske hatásának, ezért fontos megérteni az ezek által okozott limitációkat.

A világűrben jelen lévő sugárzástól nem csak ezek a nanoműholdak, hanem a nagy (több, mint 100 kg-os) műholdak számára is problémát jelenthet. Például az XMM-Newton röntgen tartományban működő űrobszervatórium mérési idejének $\sim 40\%$ -a használhatatlan. Ennek oka, hogy a műhold építéskor nem vették számításba, hogy az alacsony energiás protonok képesek lehetnek a műhold optikáján keresztül beszóródni annak detektoraiba. A következő röntgen tartományban működő műhold, az ATHENA esetében már számoltak ezzel a háttérrel. Egy elektromágnesset terveznek beszerezni, mellyel a protonokat eltérítik a detektor irányából. Ezen protonok szóródása a műhold belső felületein jelenleg vizsgálat alatt van.

Az Európai Spallációs Forrás, melyet jelenleg építenek Lundban, Svédországban a Föld legerősebb neutronforrása lesz. Alapvető tudományos mérések, mint például enzimek felépítésének vizsgálata mellett számos ipari szereplő is használni fogja ezt a neutronforrást. Olyan nagy számú neutron (~ 100 kHz mm^{-2}) fog keletkezni, hogy az eddigiekben épített neutrondetektorok nem lesznek képesek mérni ebben a környezetben.

2. Célkitűzések

A disszertációs munkám legfőbb célja, hogy új módszereket fejlesszek ki, mellyekkel pontosabbá tehetőek részecske-detektorok mind a Földön, mind a világűrben. Ehhez a cél eléréséhez meg kellett értenem különböző részecske-detektorok működését sokszálas proporcionális kamráktól kezdve. Továbbá a vizsgált problémák többsége nem volt analitikus módszerekkel modellezhetőek, ezért ezekhez dedikált Monte-Carlo alapú szimulációkat kellett kifejlesztenem. Példának hozom fel a műholdakat bombázó protonok általi aktivációt. Számptalan radioaktív izomer keletkezhet minden térfogatban annak anyagától függően, nem is beszélve a bomlási sorok elemeinek aktivitásának számolásáról, illetve a bomlástermékek kölcsönhatásáról a műhold anyagával. Az általam használt szimulációs szoftvercsomagban minden egyes alkalmazás esetében ki kellett választani, hogy mely modellekből használja fel a fizikai folyamatok hatáskeresztmetszeteit a szimuláció. Ezért létfontosságú volt a releváns fizikai folyamatok megértése.

Ennek a disszertációs munkának a célkitűzései az alábbi pontokba szedhetőek:

- A Sakurajima vulkánnál is működő, MOS detektorrendszerünk esetében alkalmazatt klasszikus algoritmus háttérelnyomásának, illetve hatásfokának számszerűsítése. Egy olyan gépészszellemen alapuló megoldás kifejlesztése, mely csökkenti a részecskeháttérrel, illetve növeli a detektor hatásfokát a klasszikus algoritmushoz képest.
- A CAMELOT nanoműhold esetében kiszámítani a várt jel-zaj arányt. Ehhez a célhoz meg kellett határoznom az összes lehetséges háttérforrást. Továbbá összeállítani a potenciálisan vizsgálni kívánt asztrofizikai objektumok listáját. Ehhez egy olyan szimuláció létrehozását tűztem ki célul, mely pontosan leírja a műholdra tervezett detektorrendszer működését.
- A HERMES nanoműholdak esetében meghatározni, hogy a geomágnesesen csapdázott protonok mekkora háttérrel okoznak a műhold mérései során. A szokásosan bevett Monte-Carlo szimulációkkal szemben egy olyan szimulációs környezet fejlesztését tűztem ki célul, mely pontosabb és egy személyi számítógépen is lefuttatható. A szimulációs környezet többtinformációt is adjon meg a klasszikus megközelítéshez képest.
- Meghatározni az alacsony impulzusú protonok hozzájárulását a háttérhez az ATHENA WFI detektorrendszer esetében. Ehhez célul tűztem ki egy olyan részletes szimuláció létrehozását, mely magában foglalja a

diverter mágneses terét, továbbá a műhold belső felületeinek mérnöki modelljét. Fontos cél volt meghatározni a műhold felületeinek mikrométeres skálájú érdességének hatását a szóródásra, melyre nem volt még példa.

- A neutronok szóródásának megértése az új Multi-Blade detektor belső felületein. Különböző geometriai konfigurációk vizsgálata szimulációk segítségével a szóródás minimalizálása véget. Céлом volt meghatározni, hogy az Európai Spallációs Forrás által meghatározott küszöbszintet túllépi-e a neutronok szóródása.

3. Felhasznált módszerek

Doktori munkámban több a Geant4 részecskefizikai programon alapú keretrendszereket fejlesztettem ki, melyekkel lehetségessé vált kozmikus részecskék és anyag kölcsönhatásának vizsgálata. A Geant4 napjaink legszélesebb körben használt részecskefizikai szimulációs szoftvere. Ennek köszönhetően legtöbb esetben tartalmazta az összes releváns részecskefizikai folyamatot, néhány kivételtől eltekintve amikor nekem kellett kifejleszteni a releváns részecskefizikai leírást, például a bomlási sorok analitikus kezelését.

Kifejlesztettem egy mély neurális hálót, mellyel lehetségessé vált a háttér megkülönböztetése a jelet jelentő müonoktól. Ezt a gépi tanuló algoritmust egy Geant4 szimuláció eredményeivel tanítottam be. A szimuláció tartalmazta a detektorrendszer minden alkotóelemét és a kiolvasó elektronika hatását a jelre. A neurális hálót a Sakurajimánál működő "Muography Observatory System" egyik detektorának négy évet felölölő méréseire alkalmaztam. A betanított háló eredményességét mérési adatok felhasználásával ellenőriztem.

Ahhoz, hogy megértem a mély neurális háló működését, egy játékelméletből származó módszert (SHapley Additive exPlanation) használtam fel. Ennek a mennyiségnek a lényege, hogy számszerűsíti, hogy melyik bemeneti változó milyen mértékben befolyásolta a háló által jósolt értéket (\sim valószínűség). Továbbá a tanításhoz felhasznált adatokkal teszteltem a jelenleg használatban lévő analízis szoftverünket, mely lineáris regresszió alapszik. Ezzel lehetővé vált, hogy ismert energiájú eseményekkel tudjuk számszerűsíteni az algoritmus hatékonyságát.

Az általam fejlesztett Geant4 alapú szoftver keresztrendszerbe belefoglaltam az optikai fotonok anyagban való haladását is szcintillátorok esetében. Ez a CAMELOT CubeSat szimulációjában és a müonok által keltett másodlagos részecskékkel való anyaganalízisében is szerepet kapott. Az optikai paramétereket mindkét esetben mérésekkel kellett meghatározni.

Létrehoztam egy olyan Geant4 alapú keresztrendszert, mellyel lehetségessé vált szcintillátort alkalmazó röntgen-tartományban működő nanoműholdak (CubeSat-ok) jel-zaj arányát meghatározni. Ehhez felépítettem egy olyan adatbázist, ami tartalmazza a részecskefizikai háttérrel jelentő komponenseket (Föld mágneses mezejében csapdázott részecskék, másodlagos részecskék, stb.) Továbbá egy olyan adatbázist ami a jelet jelentő források energiaspektrumát tartalmazta (rövid/hosszú gamma-felvillanások, magnetárok, stb.) Tipikusan egy Geant4 szimuláció esetében a műhold modelljét alkotóelemenként építik fel. Az általam fejlesztett modellben ehhez nincsen szükség, ugyanis a műhold mérnöki modelljét automatikusan beimportálom a szimulációba.

Kifejlesztettem egy olyan Geant4 alapú keresztrendszert, mellyel lehet-

séges vált bármelyik műhold alacsony Föld körüli pályán történő protonok általi felaktiválódásának kiszámítása a direkt Monte-Carlo szimulációkhoz képest két nagyságrenddel gyorsabban és pontosabban. Ehhez egy három részből álló szoftvert fejlesztettem. Az első lépésben meghatározzuk egy Geant4 szimulációval a protonok által felaktiválódott izomereket a műhold minden térfogatelemében. A második lépésben meghatározzunk analitikus úton, hogy a kérdéses időben mi lenne az izomerek és annak leányelemeinek aktivitása. Ehhez fel kellett építeni a bomlási sort minden releváns bomlási útra, majd megoldani a Bateman-egyenletet. A harmadik lépésben pedig a releváns aktivitású izomereket behelyeztem a hozzájuk tartozó térfogatba és rögzítettem a detektorban leadott energiát minden esetben. Az összes izomer választát összegezve megkaptam a detektorban várt energialeadás eloszlást.

Az ATHENA műhold esetében ahhoz, hogy meghatározzam a szórt protonokból származó háttérrel egy Geant4 alapú szimulációs programot fejlesztettem ki. Ebben a detektor körül Geant4-ben felépítettem geometriát egyesítettem a műhold környező részeinek CAD modelljével. A műholdban található mágneses teret úgy építettem bele a szimulációba, hogy a COMSOL-ban meghatározott mágneses térerősség három dimenziós térképét beolvastam a szimulációba. További fontos kérdés volt, hogy a felületeken hogyan fognak a protonok szóródni. Az eddigiekben írt szimulációkban a felületek simaságát feltételezték. Ahhoz, hogy megvizsgáljuk, hogy ez a kérdéskör szimulációkkal megérthető-e, fejlesztettem egy olyan Geant4 alapú szimulációt, melyben egy atomerő mikroszkóp (Scanning Probe Microscope) által készített szubmikrométeres felbontású modellbe becsapódó protonokat szimuláltam. A szimulációt mérésekkel ellenőriztem.

Az újonnan kifejlesztett Multi-Blade neutrondetektor esetében kifejlesztettem egy szimulációs módszert mellyel megvizsgáltam, hogy a detektor egyes komponensei mennyiben járulnak hozzá a legfőbb háttérrel jelentő neutron-szóródáshoz. Ehhez az Európai Spallációs Forrásban működő kutatócsoport szoftverét is igénybe vettem, mely tartalmazza a pontos hatáskeresztmetszeteket kis energiájú neutronokra.

4. Tézispontok

- 1. Háttérelnyomás vulkánok müografikus képein gépi tanulással**
Kifejlesztettem egy gépi tanulóalgoritmust, melynek célja, hogy a háttérrel jelentő alacsony energiájú müonokat megkülönböztesse a jelet jelentő nagyenergiás müonoktól. Mivel nem állnak rendelkezésre mérések ezzel detektorrendszerrel, melyben ismert a müonok energiája, ezért egy dedikált Geant4 alapú szimulációt fejlesztettem ki. Ebbe a szimulációba belefoglaltam a kiolvasó elektronika hatását is. Az így betanított tanuló algoritmust a Sakurajimánál működő "Muography Observatory System" detektorrendszer méréseire alkalmaztam. Összehasonlítottam a háttér elnyomóképességét az általam fejlesztett módszernek a klasszikusan használt lineáris regresszióval és azt kaptam, hogy négyszer jobban nyomja el a háttérrel. [4]
- 2. Asztrofizikai γ -sugár források várható jel-zaj arányának meghatározása nanoműholdakra helyezett szcintillátorok esetében**
Bebizonyítottam, hogy a csapatunk által épített egyik első gamma-sugárzást mérő nanoműhold (CubeSat) képes lesz rövid-, és hosszú-gammafelvillanásokat, magnetárok és földi gamma-sugár felvillanásokat mérni. Ehhez kifejlesztettem egy Geant4 alapú keretrendszert, mely tartalmazza az összes potenciális részecskefizikai háttér spektrumát. Mivel a műhold modellje közvetlen CAD modellekből lett beolvasva, ezért a szoftver más műholdak esetében is alkalmazható lesz. [1,5]
- 3. Protonok által okozott háttér tudományos műholdak esetében**
Protonoknak kétféle hatását számszerűsítettem két műhold esetében: a HERMES nanoműhold esetében meghatároztam az aktiváció hatását, míg az Athena műhold esetében meghatároztam milyen háttérrel okoznak a detektorba becsapódó protonok. A műholdakban keletkezett aktiváció gyors és pontos kiszámítására egy új módszert dolgoztam ki, mely ötvözi a Monte-Carlo alapú Geant4 szoftvert analitikus módszerekkel. Az Athena műhold esetében pedig meghatároztam, hogy a műhold elektromágnesében keltett mező mennyire csökkenti le a detektort érő protonok számát. A műhold belső felületeinek érdekességének hatását dedikált szimulációval számszerűsítettük.[2,6,7,8]

4. Szóródott neutronok által keltett háttér meghatározása a Multi-Blade detektor esetében

Meghatároztam az Európai Spallációs Forráshoz tervezett Multi-Blade neutrondetektor esetében, hogy a mérendő neutronok hogyan szóródhatnak meg a detektor belső felületein. Ehhez egy Geant4 alapú szimulációt hoztam létre, mely tartalmazott egy alacsony energijú neutronok hatáskeresztmetszetét a Geant4-nél pontosabban meghatározó könyvtárat is. A szimulációt mérési eredményekkel validáltam. Munkámmal bebizonyítottam, hogy a szóródott neutronok által keltett háttér szintje nem haladja meg az Európai Spallációs Forrás által megszabott határt. [3]

5. Folyóiratcikkek

1. **Galgóczi, G.** és mtsai.
Simulations of expected signal and background of gamma-ray sources by large field-of-view detectors aboard CubeSats
J. Astron. Telesc. Instrum. Syst., vol. 7
DOI: 10.1117/1.JATIS.7.2.028004
2. Dilillo, G ... **Galgóczi, G.** ... és mtsai.
Space applications of GAGG:Ce scintillators: a study of afterglow emission by proton irradiation
NIM B, vol. 513, 33-43 (2022)
DOI: 10.1016/j.nimb.2021.12.006
3. **Galgóczi, G.** és mtsai.
Investigation of neutron scattering in the Multi-Blade detector with Geant4 simulations
JINST, vol. 13, 12031 (2018)
DOI: 10.1088/1748-0221/13/12/P12031

6. Referált konferencia-kiadványok

4. Olah, L. ... **Galgóczi, G.** ... és mtsai.
Development of Machine Learning-Assisted Spectra Analyzer for the NEWCUT Muon Spectrometer
Journal for Advanced Instrumentation in Science (2022)
DOI: 10.31526/jais.2022.264
5. Ripa, J. ... **Galgóczi, G.** ... és mtsai.
Estimation of the detected background by the future gamma ray transient mission CAMELOT
Astronomische Nachrichten, vol. 340, 7666673 (2019)
DOI: 10.1002/asna.201913673
6. **Galgóczi, G.** és mtsai.
A software toolkit to simulate activation background for high energy detectors onboard satellites
Space Telescopes and Instrumentation 2020
Ultraviolet to Gamma Ray, vol. 11444 (2020)
DOI: 10.1117/12.2560829

7. **Galgóczi, G.** és mtsai.
Geant4 simulation of the residual background in the ATHENA Wide Field Imager from protons deflected by the Charged Particle Diverter
Astronomical Telescopes + Instrumentation (2022)
DOI: 10.1117/12.2629994

8. Breuer, J.P ... **Galgóczi, G.** ... és mtsai.
Athena charged particle diverter simulations: effects of micro-roughness on proton scattering using Geant4
Astronomical Telescopes + Instrumentation (2022)
DOI: 10.1117/12.2630076

7. További publikációk és belső jegyzetek

1. Referált konferencia-kiadvány:
Galgóczi, G. és mtsai.
A GEM based TPC for beam monitoring
The International Conference Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR2020)
DOI: 10.1088/1748-0221/15/08/C08027

2. **Galgóczi, G.** és mtsai.
Imaging by muons and their induced secondary particles — a novel technique
Innovative Particle and Radiation Detectors 2019 proceedings
JINST, vol. 15 (2020)
DOI: 10.1088/1748-0221/15/06/C06014

3. Belső jegyzet:
Galgóczi, G.
THESEUS műhold aktiváció jegyzet, 2021