

Részecskefizikai detektorok kutatás-fejlesztése müontomográfiára és a CERN ALICE-kísérletéhez

Ph.D. értekezés tézisei

OLÁH LÁSZLÓ

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Fizika Doktori Iskola

Iskolavezető: Dr. Tél Tamás

Részecskefizika és csillagászat program

Programvezető: Dr. Palla László

Témavezetők:

Dr. Varga Dezső

Dr. Barnaföldi Gergely Gábor

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont,

Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet

Budapest, 2016

1. Bevezetés

A Standard Modell jelen tudásunk szerint sikeresen leírja az anyag alkotóelemeit és azok kölcsönhatásait. Ezt a kísérleti megfigyelések döntő többsége megerősíti. Azonban számos nyitott kérdés is van, pl. hogyan keletkezett az Univerzum vagy hol található a hiányzó antianyag. Ezekre a kérdésekre új kísérletekkel, vagy a jelenlegiek továbbfejlesztésével adhatunk választ. E kísérletekben a részecskegyorsítóknak keltett, vagy a kozmikus sugárzásban keletkező részecskéket mérjük detektorokkal. Jelen doktori értekezés elsősorban a részecskefizikai detektorok kutatás-fejlesztésére koncentrál.

Az Európai Részecskefizikai Laboratórium (CERN) Nagy Hadronütköztetőjénél (LHC) található A Nagy Ionütköztető Kísérlet (ALICE). E kísérlet a nehézionok ütközésekor keletkező kvark-gluon plazmát (QGP) vizsgálja részecskepálya-mérő, azonosító és energiamező detektorok összetett rendszerével. A QGP tulajdonságainak precízebb mérése céljából a nehézion ütközések energiájának és luminozitásának növelése szükséges, amely maga után vonja az ALICE aldetektorok működésének jobb megértését és továbbfejlesztésüket.

A részecskefizikai berendezések és eljárások fejlődése új alkalmazások megjelenéséhez is vezet. A müonradiográfia vagy müontomográfia a kozmikus müonok nyomkövetésén alapuló képalkotási eljárás. Ez alkalmazható nagy méretű vagy nagy sűrűségű objektumok képalkotására. Egy alkalmas berendezéssel folyamatosan mérhetnénk a tűzhányók sűrűségváltozását és előre jelezhetnénk azok kitörését is. Hasonlóan, ha képet alkothatnánk kis rendszámú anyagokról, az utat nyitna egy nem-invazív orvosi képalkotó eljárás létrejöttéhez.

2. Célkitűzések

Tudományos munkámat a Wigner FK MTA Lendület Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoportjában (REGARD) és az ALICE kísérleti együttműködésben végeztem. Motivációm a gáztöltésű detektorok projektorientált kutatás-fejlesztése volt nagyenergiás fizikai kísérletek számára, nagy részecskefizikai detektorrendszerek továbbfejlesztésére, valamint alkalmazott kutatásokra.

A REGARD csoporttal kifejlesztettük a sokszálas detektorok új változatait kis anyagfelhasználással és optimalizált helyfelbontással. Demonstráltuk, hogy a közeli katódos kamra (CCC) és a továbbfejlesztett sokszálas proporcionális kamra (MWPC) alkalmazható töltött részecskék nyomkövetésére.

Tudományos munkám célja sokszálas kamrákon alapuló detektorrendszerek fejlesztése, építése és alkalmazása volt:

1. Az ALICE aldetektorainak felkészítése az LHC nagy luminozitású periódusaira: a Nagy Impulzusú Részecske Azonosító Detektor (HMPID) működési paramétereinek és öregedésének vizsgálata a mérési adatok elemzésével.
2. Megbízható, kis fogyasztású, optimalizált hely- és szögfelbontású, hordozható detektorrendszerek kutatás-fejlesztése és építése müonradiográfiai célokra.
3. A kifejlesztett gáztöltésű detektorrendszerek müonradiográfia-ra történő alkalmazhatóságának kísérleti igazolása.
4. Kis rendszámú és kis méretű anyagok képalkotása kozmikus müonok nyomkövetésével.

3. Alkalmazott kutatási módszerek

Az ALICE HMPID vizsgálatára kifejlesztettem egy adatelemző szoftvert az ALICE analízis keretrendszerben. A vizsgálat során elemzett adatokat az LHC proton-proton (p-p) és proton-ólom (p-Pb) ütközések adatainak ALICE Griden történő rekonstrukciójával állítottam elő. Az adatok elemzése a HMPID csoport által kifejlesztett részecskepálya és Cserenkov-gyűrű rekonstrukciós algoritmusok alkalmazásával indul. Ezt követően az események és részecskepályák válogatása, majd a fotoelektron-klaszterek töltéeloszlásának, ill. számának meghatározása következik minden fotokatódra. A szoftver a töltéeloszlásokat illeszti, valamint kiszámolja a detektorrendszer működési paramétereit: a gázerősítést, az egy-foton detektálási határfokot. Az adatelemzés eredményeit implementáltam a HMPID detektor szimulációjában, és kiszámoltam a fotokatódok kvantumhatárfokát a mért fotoelektron-klaszter számok reprodukciójával.

A müonradiográfiára fejlesztett detektorrendszerek működési paramétereinek számszerűsítésére, optimalizálására és a kozmikus müonok fluxusának számolására kifejlesztettem egy speciális adatelemző szoftvert. Ez két fő részből épül fel: az elő-analízis meghatározza a kamrák globális helyét, pozicionálja azokat és kizárja a további analízisből a jelkiolvasó-elektronikák zajos csatornáit. Ezt követően a fő-analízis kiszámolja a hely- és szögfelbontást, a nyomkövetési határfokot, a fluxust, valamint a további paramétereiket, pl. a gázerősítést.

Az adatelemző szoftverhez dedikált rekonstrukciós algoritmusokat fejlesztettem. Egy klaszter kereső algoritmus végzi a részecskék

áthaladását jelző szál- és parkettacsoportok rekonstrukcióját. Ez kiszámolja a klaszterek középpontjának helyét és méretüket minden kamrán. A részecskepályák rekonstrukcióját egy kombinatorikus algoritmus végzi. Ez előállítja a részecskepályajelölteket a klaszterekből, majd kiválasztja a legjobban illeszkedő jelöltet annak meredekségével, tengelymetszetével és az illesztés jóságával (χ^2/NDF).

A kamrák hatásfokának számolására egy további kombinatorikus algoritmust fejlesztettem. Ez előállítja az alrészecskepályákat egy-egy vizsgált kamra kihagyásával, extrapolálja azokat a kihagyott kamrára, és megvizsgálja, van-e klaszter az extrapolált koordináta helyének közelében.

Az MWPC-alapú detektorrendszerben az elektronok és kisenergiás müonok elnyomásához szükséges ólomabszorber rétegek mennyiségét, valamint a detektorrétegek elhelyezését GEANT4 keretrendszerben vizsgáltam. A szimulációval előállított adatokat a mérési adatokra is alkalmazott eljárásokkal elemeztem. A különböző energiájú részecskék eltérülését a detektorrendszerben a pályájuk illeszkedésének jósága jellemezte. Meghatároztam a részecskék túlélési valószínűségét (a detektorrendszeren irányváltoztatás nélkül áthaladó részecskék számának és a generált részecskék számának aránya) különböző detektor-elrendezésekhez, az energia függvényében.

A kifejlesztett hordozható detektorokkal a Jánossy aknában végzett méréseket GEANT4 keretrendszerben szimuláltam és a tényleges mérésekkel összehasonlítottam.

Az ismeretlen üregek 3σ (99,7%) konfidencia szinttel történő kimutatásához szükséges mérési időt szintén GEANT4 szimulációval határoztam meg.

4. Eredmények

A főbb eredményeket a következő tézispontokban foglalom össze:

1. Meghatároztam a HMPID detektor fő működési paramétereinek (gázerősítés, egy-foton detektálási határfok és detektált fotonok száma) változását az ALICE kísérlet 2010 és 2013 között felvett p-p és p-Pb ütközési adatainak elemzésével [13, 14]. Kiszámoltam a fotokatódok kvantumhatásfokának változását Monte Carlo szimulációval [14]. A működési paraméterek és a kvantumhatásfokok a mérési periódus végén is a detektor tervezésekor meghatározott értékeket mutattak minden modulra, kivéve a RICH2 modult. A fotokatódok nem mutatták öregedés jelét. Eredmények azt mutatják, hogy az ALICE HMPID képes a harmadik LHC periódus végéig (2023.) megfelelő adatokat biztosítani.

Az egyéni eredményeim mellett hozzájárultam az ALICE időprojekciós kamrájának (TPC) továbbfejlesztéséhez [15]. Építettem a REGARD csoporttal egy minőségellenőrző detektort a TPC gáz elektron sokszorozó (GEM) alapú részecskenyomkövető detektorok gázerősítésének mérésére. Részt vettem a GEM fóliák CERN Protonsinkrotron (PS) és Szuper Protonsinkrotron (SPS) részecskegyorsítóinál végzett tesztmérésein [15]. Hozzájárultam a Nagyon Nagy Impulzusú Részecskeazonosító Detektor (VHMPID) fejlesztéséhez a CCC kamrák építésével és azok tesztméréseivel a CERN PS részecskegyorsítónál [16, 17, 18].

2. Kifejlesztettem és építettem egy hordozható, alacsony fogyasztású ($< 6 \text{ W}$) detektorrendszert a kozmikus müonok fluxusának mérésére és müonradiográfiára a CCC kamrák felhasználásával [1, 2, 7, 8]. Mérésekkel számszerűsítettem és optimalizáltam a detektorrendszer működési paramétereit. Megmutattam, hogy a detektorrendszer nyomkövetési hatásfoka 99 % felett van, szögfelbontása jobb mint 15 mrad.

Az új fejlesztésű MWPC kamrák felhasználásával kifejlesztettem és építettem egy detektorrendszert müonradiográfiára [3]. Mérésekkel meghatároztam a fő működési paramétereiket. A detektorrendszer nyomkövetési hatásfoka több mint 99 %, helyfelbontás jobb mint 4 mm. Maga a detektor a müonok fluxusán elhanyagolható ($2,2 \cdot 10^{-4}$) háttérrel okoz és változó környezeti paraméterek (hőmérséklet, páratartalom, légnyomás) mellett is stabilan működik. Demonstráltam, hogy a kis energiájú részecskék elnyomásához szükséges ólomabszorberek vastagsága a korábban alkalmazott 100 sugárzási hosszról 16 sugárzási hosszra csökkenthető. Ezekkel az eredményekkel hozzájárultam a nagyméretű objektumok, pl. aktív tűzhányók belsejéről müonradiográfiával képet alkotó „Muographic Observation System” első prototípusának kifejlesztéséhez [6].

3. Mérésekkel demonstráltam, hogy a hordozható detektorok alkalmazhatók a kozmikus müonok fluxusának mérésére és föld alatti üregek kimutatására [1, 2, 7, 8, 9, 10]. Megmértem a kozmikus részecskék szögeloszlását Kőbánya alagútrendszerében. Az ott mért eloszlások jól korreláltak a geodéziai mérésekkel és

kimutatták a szellőzőjáratokat. Megmértem és szimulációval számszerűsítettem a müonok fluxusát a MTA Wigner FK területén található Jánossy aknában. A mérések és a szimulációk eredményei egyeztek, valamint kimutatták föld alatti alagutakat. A további mérésekhez meghatároztam az ismeretlen üregek 3σ (99,7%) konfidencia szinttel történő detektálásához szükséges mérési időt.

Továbbá, megmértem a müonok fluxusát egy tervezett kísérlet helyén a drezdai Felsenkellerben. Kiszámoltam a tervezett kísérlet várható kozmikus háttérét és hozzájárultam a kísérletben alkalmazott detektorok helyének meghatározásához [11, 12].

4. Hozzájárultam egy új, kozmikus részecskék nyomkövetésén alapuló képalkotási eljárás kifejlesztéséhez, amely alkalmazható kis méretű és kis rendszámú anyagok képalkotására [4, 5]. Az új eljárás a kozmikus részecskék és azoknak a vizsgált objektummal történő kölcsönhatása során keletkező fotonok együttes detektálásán alapul. A módszer demonstrálására építettünk foton-detektorból (nagy tisztaságú germánium detektor, HPGe vagy szcintillátor) és részecskepálya-mérő detektorból felépülő berendezéseket. Ezekhez megépítettem és üzembe helyeztem a részecskepálya-mérő detektort. A mérési adatok elemzésével megmutattam, hogy a berendezés közel 99% hatásfokkal rekonstruálja a müonok pályáját és a vizsgált objektumról 2,5 mm-nél jobb felbontással alkot képet. Hozzájárultam a képalkotási eljáráshoz a detektoron keresztülhaladó müonok pályá-

jának rekonstrukciójával és azok helyének meghatározásával a vizsgált objektumban. Az új módszerrel sikeresen megkülönböztettük egymástól a vizsgált réz mintát és a HPGe detektor alumínium sapkáját, valamint képet alkottunk a szcintillátor detektor belsejében elhelyezett csotról – mindössze egy nap időtartamú mérésekkel. Az új képalkotási eljárásnak egy fontos előnye, hogy a mérések során a vizsgált objektumot csak a természetes háttérsugárzás terhelése éri. A kifejlesztett eljárás alkalmazható lehet a későbbiekben orvosi képalkotásra is.

Hivatkozások

Referált publikációk (impakt faktor; független hivatkozások)

- [1] G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, L. Oláh, G. Surányi, D. Varga: NIM A **689** (2012) 60-69 (1,125; 12)
- [2] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, D. Varga: Adv. in HEP **2013** (2013) 560192 (2,54; 6)
- [3] D. Varga, G. Hamar, G. Nyitrai, L. Oláh: Adv. in HEP **2016** (2016) 1962317 (-; 0)
- [4] I. Bikit, D. Mrdja, K. Bikit, J. Slivka, N. Jovancevic, L. Oláh, G. Hamar, D. Varga: Eu. Phys. Let. **113** (2016) 58001 (-; 0)
- [5] D. Mrdja, I. Bikit, K. Bikit, J. Slivka, J. Hansman, L. Oláh, D. Varga: elfogatott cikk (2016. 12. 7.) Eu. Phys. Let. (-; 0)

Szellemi tulajdon

- [6] G. Hamar, T. Kusagaya, L. Oláh, H. K. M. Tanaka, D. Varga:
Muographic Observation System PTZTA153 (2016. 4. 25.)

Könyv fejezet

- [7] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh,
P. Pázmándi, G. Surányi, D. Varga: „Muography: Perspec-
tive Drawing in the 21st Century” c. könyv 6. fejezete, UMUT,
2015 (0; 1)

Referált konferencia cikkek

- [8] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi,
D. Varga: Geosci. Inst. Meth. Data Sys. **1** (2012) 229-234 (0; 10)
- [9] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi,
D. Varga: Astropart., Particle, Space Phys., Rad. Interaction,
Detectors and Medical Phys. App. **8** (2014) 280-284 (0; 0)
- [10] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi,
D. Varga: J. Phys.: Conf. Ser. **632** (2015) 012020 (0; 0)
- [11] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi,
D. Varga: Proc. of Sci. (XIII NIC) **129** (0; 0)
- [12] L. Oláh, G. Surányi, G. G. Barnaföldi, D. Bemmerer, G. Hamar,
H. G. Melegh, D. Varga: Journal of Physics: Conference Series
665 (2016) 012032 (0; 2)

Kollaborációs publikációk

- [13] ALICE HMPID: Performance of the HMPID detector during LHC Run1 and perspectives, ALICE publikus jegyzet (2016)
<https://aliceinfo.cern.ch/Notes/node/474>
- [14] L.Oláh on behalf of the ALICE: The performance of the ALICE High Momentum Particle Identification Detector in pp, p-Pb and Pb-Pb collisions, Poszter QM2014 Konferencián
<https://indico.cern.ch/event/219436/contributions/1523334/>
- [15] ALICE TPC: Addendum to the Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber, CERN-LHCC-2015-002 (2015)
<http://cds.cern.ch/record/1984329/files/>
- [16] VHMPID: EPJ PLUS **129** (2014) 91 (1,521; 2)
- [17] VHMPID: NIM A **766** (2014) 92-95 (1,2; 0)
- [18] VHMPID: NIM A **767** (2014) 50-60 (1,2; 0)
+ 144 további ALICE publikáció (2016. 12. 7.)
<https://vm.mtmt.hu/www/index.php?AuthorID=10040437>

Magyar nyelvű ismeretterjesztő cikkek

- Barnaföldi G. G., Bencédi Gy., Hamar G., Melegh H. G., Oláh L., Surányi G., Varga D.: Fizikai Szemle (2011) 12
- Kálmán D., Oláh L., Barnaföldi G. G., Hamar G., Melegh H. G., Surányi G., Varga D.: Nukleon, **V** (2012) 5
- Oláh L.: Természet Világa **144** (2013) 4