NYITRAI GÁBOR SZAKDOLGOZAT



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR



Műszaki Mechanikai Tanszék

NAGY FELBONTÁSÚ MINŐSÉG-ELLENŐRZŐ RENDSZER RÉSZECSKEDETEKTOROKHOZ

Nyitrai Gábor Gépészmérnök BSc

Konzulens:

Dr. Varga Dezső MTA Wigner FK Részecske és Magfizikai Intézet

Témavezető:

Dr. Magyar Bálint BME Műszaki Mechanika Tanszék

Budapest, 2015

NYILATKOZATOK

Beadhatósági nyilatkozat

A jelen szakdolgozat az intézmény által elvárt szakmai színvonalnak mind tartalmilag, mind formailag megfelel, beadható.

Kelt, 2015-12-16

Az üzem részéről:

üzemi konzulens

Elfogadási nyilatkozat

Ezen szakdolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E szakdolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2015-12-16

témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, Nyitrai Gábor (UWB2U1), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2015-12-16

szigorló hallgató

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Varga Dezsőnek, amiért lehetőséget biztosított a kutatócsoportban való részvételre. Széleskörű támogatása és iránymutatásai nélkül nem jöhetett volna létre ez a munka.

Szeretném megköszönni Kiss Gábornak, Oláh Lászlónak, Hamar Gergőnek, Galgóczi Gábornak és a REGARD csoport minden tagjának a közös munkát, és hogy tanácsaikkal és támogatásukkal segítettek.

Nem utolsó sorban szeretném még megköszönni Nyáry Annának, Sánta Botondnak, Csengeri Bélának, Kátai Andrásnak és Lucsányi Dávidnak a segítséget, amit a szakdolgozat megírásában adtak.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezető Részecskedetektorok					
2.						
3.	Forgatható keret szálak kifeszítésére					
	3.1.	Sokszálas proporcionális detektorok készítése	6			
	3.2.	Tervezés és kivitelezés	10			
	3.3.	Továbbfejlesztési lehetőségek	14			
4.	Szálfeszesség mérés					
	4.1.	A vizsgálat célja	15			
	4.2.	Mérési berendezés leírása	16			
	4.3.	Mérési eredmények	19			
5.	GEM rétegek optikai minőség-ellenőrzése					
	5.1.	A minőség-ellenőrző rendszer funkciója	25			
	5.2.	A rendszerhez tervezett részegységek	28			
	5.3.	A LED pozicionáló egység	30			
6.	5. Összefoglaló					
7.	. Summary					
8.	Hiva	ntkozások	36			

1. Bevezető

A részecskefizika az anyag legalapvetőbb építőköveivel, az elemi részecskékkel, a sugárzással és azok kölcsönhatásával foglalkozik. Az elmúlt 100 évben a fizika egyik legintenzívebben kutatott ága. Számos Nobel-díjat ítéltek oda ezen a tudományterületen, például idén 2015-ben a neutrínó oszcilláció jelenségének felfedezését jutalmazták. Ezzel azt bizonyították, hogy napjaink elfogadott részecskefizikai modellje, az ún. Standard Modell nem írja le teljesen az univerzum felépítését. A kísérleti részecskefizika célja, hogy feltárja az elemi részecskék tulajdonságait, igazolja vagy cáfolja az elméleti eredményeket, vagy új elemeket fedezzen fel.

A kísérleti részecskefizika legalapvetőbb eszközei a részecskéket előállító és ütköztető gyorsító berendezések és a részecskedetektorok, amelyek a részecskék fizikai paramétereit, pl. energiáját, impulzusát, tömegét vagy pályáját mérik meg. A részecskék pályájának precíz mérésére kevés anyagot tartalmazó detektorokat alkalmaznak, melyek egyik legelterjedtebb és költséghatékony típusa a gáztöltésű detektor.

Szakdolgozatom elkészítése során lehetőségem nyílt bekapcsolódni a gáztöltésű detektorok kutatásával és fejlesztésével foglalkozó REGARD csoport (MTA Wigner FK, RMI, Nagyenergiás Fizika Osztály, Innovatív Detektorfejlesztés csoport¹) munkájába. A célom olyan eszközök építése és mérési módszerek kifejlesztése volt, amelyek segítséget nyújtanak a gáztöltésű detektorok tervezéséhez és hatékonyabbá teszik a berendezések építését és működését.

Szakdolgozatom elején ismertetem a részecskedetektorok főbb típusait, részletesebben érintve a gáztöltésű detektorokat. A harmadik fejezetben bemutatom az általam tervezett és épített szálfeszítő keretet amely segítségével sokszálas detektorok építhetők. A negyedik fejezetben közlöm a sokszálas detektorok szálfeszességének mérésére fejlesztett módszert, a méréseket és az eredményeket. Végül ismertetem az ún. gáz elektron sokszorozó (Gas Electron Multiplier, GEM) detektorokhoz a REGARD csoport által épített minőség-ellenőrző berendezést, és bemutatom a rendszerhez fejlesztett részegységeket.

¹http://regard.kfki.hu/

2. Részecskedetektorok

A detektorok feladata, hogy meghatározzák a részecskék helyét, irányát, energiáját vagy egyéb tulajdonságait. Ezek a részecskék egyrészt származhatnak részecskegyorsítókból, melyekben feszültség hatására nagy mozgási energiára tesznek szert, majd ütköztetve őket további részecskék keletkeznek. Eredhetnek még radioaktív forrásból, a kozmikus háttérsugárzásból, vagy fotonok esetén valamilyen fényforrásból.

A részecskedetektorok működésüket tekintve a következőképpen csoportosíthatók: gáztöltésű, félvezető, szcintillációs, vizuális és Cserenkov-detektorok, melyek felhasználási lehetőségeik is szerteágazóak.

Az első vizuális nyomkövető detektor a Wilson-féle ködkamra volt, melyért C. T. R. Wilson 1927-ben Nobel-díjat kapott. A detektorkamrában túltelített gőz található, melyben az áthaladó részecske nyomvonalán a kondenzációs magvak kicsapódnak és láthatóvá válik a részecske pályája. Hasonlóan vizuális elven működő detektorok még a buborékkamrák, valamint emulziós és nyomdetektorok.

A *Cserenkov-detektor* olyan fotonok detektálására szolgál, melyek egy töltött részecske közegbeli fénysebességnél gyorsabb haladásakor keletkeznek. Ez a Cserenkov-sugárzás, mely kúp alakban terjed a részecske mögött, ennek nyílásszöge határozza meg a részecske sebességét.

Szcintillációs detektorokban az áthaladó töltött részecske vagy γ -foton hatására a szcintillátor anyag molekulái vagy atomjai gerjesztett állapotba kerülnek, az alapállapotba való visszatérés során pedig fotonok, azaz lumineszcenciafény bocsátódik ki. Ezt a fényt pedig egy fotoelektron-sokszorozó detektálja. Kitűnő időfelbontásuk miatt sok helyen alkalmazzák, például más mérések triggereléséhez.

A *félvezető detektorok* jó energia- és helyfelbontású, gyors és hatékony nyomkövető detektorok, viszont nagyon drágák. A félvezető detektorok jelentős szerepet játszanak az Európai Nukleáris Kutatási Szervezetnél (CERN) működő Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) nagyobb kísérleteinél, az ALICE, ATLAS, CMS, LHCb és TOTEM berendezésekben. A *gáztöltésű detektorok* nagy energiájú töltött részecskék detektálására szolgálnak, melyek segítségével meghatározhatjuk az áthaladt részecskék által leadott energiát vagy az áthaladás helyét. Működésük alapja, hogy a beeső sugárzás hatására a gázban elektron-ion párok keletkeznek. Ezek száma nagyban függ a gáz összetételétől. Töltőgázként leginkább nemesgázokat szokás használni, ionizációs potenciáljuk ugyanis megfelelően alacsony. Az anódfeszültség függvényében többféle detektorról beszélhetünk, ilyen például a proporcionális detektor. Ennél az elektromos térerő hatására az elektronok az anódszál felé sodródnak. Az anódszál közelében a nagy elektromos tér hatására az elektronok újabb elektronokat ütnek ki semleges atomokból, elektronlavinát keltve. Ez az erősítés akár 10⁵ nagyságrendű is lehet. Az elektronok egy anódszálra gyűlnek és egy mérhető jel keletkezik (1. ábra). A mért jel így az ionizáció energiájánál jóval nagyobb, de azzal arányos (proporcionális) értékű [1].



1. ábra. Elektron-lavina keletkezése az anódszál közelében [1].

A folyamatos elektron-utánpótlás miatt a kisülés fönntartaná magát, lehetetlenné téve ezáltal az újabb részecskék detektálását. Ennek elkerülésére egy módszer, hogy töltőgázként a nemesgáz mellett használnak valamilyen többatomos gázt is, például szénhidrogéneket. Ezek elnyelik a lavinát fotoeffektussal újra és újra beindító UV fotonokat.

A *Geiger–Müller-számlálócső* (GM-cső) olyan gáztöltésű detektor, melyben az anódfeszültség nagyobb a proporcionális detektorokénál. A jel nagysága nem arányos az ionizáció energiájával, tehát az eszköz nem alkalmas a részecske energiájának mérésére, viszont egyszerű felépítésének köszönhetően kiválóan alkalmas az ionizációk számának mérésére. A kisülések önfenntartó hatását a feszültség csökkentésével kerülik el.

2 Részecskedetektorok

Ha nem csak a részecskék energiaveszteségét, hanem az áthaladás helyét is meg akarjuk határozni, akkor erre alkalmasak a *sokszálas proporcionális kamrák* (multi wire proportional chamber, MWPC). Az MWPC-k kialakítása a 2. ábrán látható. A katód két síklemezből áll, köztük vannak kifeszítve az azonos feszültségre kapcsolt anódszálak.



2. ábra. A sokszálas proporcionális kamrák kialakítása [1].

Napjaink egyik feltörekvő gázdetektor-technológiája a *mikrostruktúrás detektor*. Az egyik legelterjedtebb típusa a GEM detektor [2]. Működési elvét tekintve hasonlít a sokszálas elrendezésre, azonban ennél az elektromos erőtér előállítására nem kifeszített szálakat használnak, hanem nyomtatott áramköri lapokat. A mikrostruktúrák előnye, hogy sokkal jobb a helyfelbontásuk és a keletkező lavinák kevésbé vannak hatással a detektor működésére (kisebb a holtidő). Egyik hátrányuk, hogy mivel az anódok igen közel helyezkednek el egymáshoz (~200 μm), nagy az esélye az elektromos kisüléseknek, szikráknak, melyek tönkretehetik a detektort. A biztonságos üzemelés érdekében csak kisebb feszültségeket lehet használni, így viszont szükség van egy közbenső erősítő rétegre. Ezt a feladatot látják el a GEM-ek (Gas Electron Multiplier, 3. ábra).



3. ábra. GEM lapok kialakítása [3].

A fentebb ismertetett detektorok két dimenzióban mérik meg a részecskék áthaladásának helyét, tehát a részecskepályák 3 dimenzióban való méréséhez több egymást követő detektorrétegre van szükség. Ezek egyszerűsítése szolgál az ún. *időprojekciós kamra* (Time Projection Chamber, TPC), amely egy gáztérfogaton belül képes 3 dimenzióban rekonstruálni a töltött részecskék pályáját. Az ionizáció során keletkezett primer elektronok a homogén elektromos tér hatására egy kétdimenziós kiolvasó (általában MWPC) felé sodródnak állandó sebességgel ("driftsebesség"). A harmadik koordináta az ionizáció és a kiolvasás közt eltelt időből és a driftsebességből határozható meg.

A következő fejezetekben bemutatom a sokszálas proporcionális detektorok építéséhez fejlesztett berendezésemet és mérési módszereimet, valamint a GEM detektorok minőségellenőrzéséhez fejlesztett eszközeimet.

3. Forgatható keret szálak kifeszítésére

3.1. Sokszálas proporcionális detektorok készítése

Detektorok felépítése

A REGARD csoport egyik saját fejlesztésű detektora a közelkatódos kamra (Close Cathode Chamber, CCC) [4]. A felépítése hasonlít az MWPC-kre, lényeges különbség azonban, hogy a szálak síkjában az anódszálak mellett ún. "térformáló" szálak is ki vannak feszítve (4. ábra). Másik fontos tulajdonsága, hogy a szálsík aszimmetrikusan, az egyik katódlemezhez közelebb helyezkedik el a kamrán belül.



4. ábra. A közelkatódos kamra (Close Cathode Chamber, CCC) kialakítása [1].

Az anódszálak átmérője 20-30 μ m, a térformáló szálaké 100-120 μ m. A felső katódlemezre és a térformáló szálakra a megfelelő elektromos erőtér létrehozása érdekében nagy feszültség van kapcsolva (jellemzően -500 V vagy több), a vékony anódszálak pedig ~1000 V potenciálon vannak. A szálakat polimetil-metakrilát hasábok vezetik meg, lézergravírozással 1 mm mélyen barázdálva. A detektor Ar-CO₂ gáztöltésű, 80:20 körüli keverési aránnyal. Fontos, hogy az O₂ szint nagyon alacsony (<0,1%) maradjon, ezért a gázt folyamatosan keringetni kell 0,5-51/h áramlási sebességgel.



5. ábra. Detektor kamrájának metszeti ábrája száliránnyal szemben és oldalról. A szerkezeti elemek kétkomponensű epoxival vannak ragasztva [5].

Ez a konstrukció egyszerűbb, súlyát tekintve könnyebb és költséghatékonyabb, mint a hagyományos sokszálas proporcionális detektor. Mechanikai szempontból a legfontosabb tulajdonsága a korábbi MWPC-kel szemben, hogy mivel a szálsík és az alsó katódlemez közti távolságra kevésbé érzékeny, ezért nincs szükség robusztus tartószerkezetre (5. ábra) [5]. A detektor könnyen készíthető és szállítható. Az oldalfalak üvegszálas epoxi rudakból állnak össze. A szerkezet elemei epoxi ragasztóval vannak rögzítve, ez biztosítja az elemek közti gázzárást is, ugyanakkor emiatt szerelés után már nem lehet megbontani javítás vagy fejlesz-tés céljából. A gázzárást túlnyomásos nyomáspróbával kell ellenőrizni.

A CCC detektorok egyik fő felhasználási célja a kozmikus sugárzásból származó müon részecskék detektálása, fluxusuk meghatározása [6]. Különböző anyagok más mértékben engedik át a müonfluxust, így az eszköz alkalmas arra, hogy meghatározzuk, milyen anyagon haladhatott keresztül a sugárzás (müon-tomográfia). Az eszközt sikeresen alkalmazták föld alatti mérések során rejtett barlangi járatok és üregek keresésére. További érdekes felhasználási lehetőség például vulkánok kitörésének online előrejelzése, vagy piramisokban rejtett kamrák felfedezése.

CCC detektorból eddig $400 \times 400 \text{ mm}^2$ vagy ennél kisebb felületű konstrukciók készültek. A detektortípus előnyös tulajdonságaiból fakadóan ennél hosszabb (akár 1 m) is lehet az aktív szálhossz. Nagyobb felülettel több részecskét detektálhatunk, így növelhetjük az adott időre vonatkozó mérések precizitását.



6. ábra. Szálak adagolásának elvi vázlata. Egy tárcsáról adagolva, a keret forgatásával kifeszítjük a szálakat a megfelelő osztásban. [7]

Szálfeszítő keret funkciója

Első lépésben az alap katódlemezre fel kell ragasztani az oldalfalakat és szálvezetőket. A ragasztott elemeket lesúlyozva legalább 24 órát kell várni, míg a gyanta és erősítő komponensek térhálósodása után a megfelelő szilárdságú kötés létrejön. Ezzel az eljárással az elemek nem egészen jól definiáltan helyezkednek el egymáson. Ez a konstrukció működése szempontjából nem baj, azonban a szálak felhelyezése teljes egészében nem automatizálható.

A tervezendő eszköz egy olyan forgatható keret, melyre rögzítve a detektort a szálak kifeszíthetőek. Erre a célra egy sík téglalap alakú keretet használunk, melyre feltekerjük a szálakat. A keret egy középen átmenő tengellyel van felhelyezve egy állványra. Egy tárcsából adagoljuk a szálat, és a szükséges osztásban csévéljük fel a szálakat (6. ábra).

Korábbi megoldásként szolgált egy egyszerű alumíniumszelvényekből összerakott váz (7. ábra). A szálak pozicionálását a megfelelő osztásba egy polioximetilén (POM) hengeres rúd oldja meg, melynek palástfelületén kétbekezdéses spirális bemetszés biztosítja a szálak pontos távolságát. Azért van szükség két bekezdésre, mert kétféle szálat akarunk kifeszíteni, tehát a menetemelkedése is a szálak távolságának duplája kell legyen. A keret mindkét oldalára felrögzítünk 1-1 detektort, így egyszerre kettőt tudunk elkészíteni.



7. ábra. Korábbi szálfeszítő keret kisebb detektorokhoz.

A tárcsa egy villanymotorra van kapcsolva. Az adagolással ellentétes irányú, egyenletes szálfeszítéshez szükséges nyomatékkal húzzuk a szálakat.

Ilyen keretekkel csak adott nagyságú és felbontású detektorokat lehet készíteni. Egyéb paraméterű detektorok készítéséhez egy automatizált száltekerő gép áll rendelkezésre (8. ábra). Ennél nem rögtön a detektorra, hanem egy hosszanti tengellyel párhuzamosan szétválasztható keretre feszítjük ki a szálakat. A feltekerés után le kell ragasztani, majd a keret éleinél elvágni a szálakat. A keretet rá kell helyezni a detektorra, és így már beforraszthatóak a szálak a megfelelő helyekre.

A fejlesztés célja egy olyan konstrukció létrehozása, mely a meglévő megoldásoknál hatékonyabbá teszi a detektorépítést, nem drága és mobilis. További célkitűzés, hogy az eszköz $800 \times 800 \text{ mm}^2$ felületű detektorok építésére legyen optimalizálva.



8. ábra. Automatizált szálfeszítő gép. Hátránya, hogy a detektor sok lépésben épül, a folyamat hosszú és több hibaforrást rejt magában, valamint nagy szálközök nem állíthatóak be.

3.2. Tervezés és kivitelezés

A tervezés során, alapul véve a korábbi megoldásokat, a 7. ábra szerinti konstrukcióból indultam ki. A keretnek itt is mindkét oldalára detektor kerül és POM hengerek pozicionálják a szálakat. A korábbi megoldásnál viszont a detektorok felhelyezése és rögzítése körülményes, mert a szorítópofák fix helyzetűek, így azokat minden alkalommal szét kell szerelni. Erre a problémára kifordítható szorítófejeket terveztem.

Másik időigényes probléma a detektor igazítása a kereten, hogy a szálak megfelelő helyen legyenek. Egyrészt a detektor száltartója az oldalfalhoz képest változó távolságra lehet. Másrészt a POM rúd bemetszésének menetemelkedése miatt az egyik detektor első szála a másik detektor első szálához képest egy fél menetemelkedéssel el van tolva. Korábbi szerkezeten a POM rúd rögzített helyzetű volt, tehát a detektorok igazítása az első szál felhelyezése után történt. Ebből kifolyólag általában több iterációs lépés volt a megfelelő helyzet beállítása. Ennek megoldására a POM rudakat forgathatóvá terveztem, megkönnyítve ezzel a beállítást.



9. ábra. (Bal oldal) Az elkészült új szálfeszítő keret. (Jobb oldal) Szorítófej közelebbről.

A keret befoglaló méreteinek számításához figyelembe kell venni, hogy legyen elég hely a fentebb említett igazításokhoz. A detektorban 65 térformáló, köztük pedig 64 vékony anódszál van. A térformáló és anódszálak közt 6 mm térköz van. A szélső szálak és a fal közt 3-3 mm hely van. Az oldalfalak vastagsága 10 mm. Ezekkel a detektor kiadódó négyzet alakú alapterülete

 $2 \cdot 64 \cdot 6 \ mm + 2 \cdot 3 \ mm + 2 \cdot 10 \ mm = 794 \ mm.$

A tervezett keret vázlata a 10. ábrán látható. Az új szerkezet vázát $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ alumíniumszelvények (AlMgSi1) adják. A POM rúd bemetszésének menetemelkedése 12 mm, vagyis egy adott szál átcsévélve a rúdon 6 mm-el lesz beljebb. Ha a keret külső mérete 800 mm, akkor a két detektor a szélekre igazítva pont megfelelő távolsággal lesz eltolva.

A POM rudak gyártása csak két részben volt megoldható, tehát azokat szerelés után egy átmeneti illesztésű csap-furat kötéssel össze kell szorítani. A hengerek végében menetes furat van, és egy csavaron keresztül csatlakoznak a rögzítő pántokhoz. A rudak ellentétes irányú csavarásával egyrészt egymáshoz szoríthatóak, azonos irányú csavarásával pedig a paláston lévő bemetszések helyzete finomhangolható.





A szorítófejek a vázhoz egy tömör 20 mm \times 20 mm alumíniumrúdon keresztül csatlakoznak. Ezek a toldások veszik fel a szorításból adódó csavaró nyomatékot és adják át a keretnek a terhelést. Ezt az igénybevételt a keresztirányban rögzített merevítő szelvények veszik át. A toldás közepén lévő menetes furatba egy szár csatlakozik. Ezen tetszőleges magasságban egy híd lemez rögzül, a lemez túloldalán egy menetes furaton csavar megy át. A detektor oldalfalát egy szorítópofa nyomja a keretnek, a megfelelő erőt a hengeres fejű csavar tekerésével hozzuk létre. Annak érdekében, hogy a szorítópofa ne különálló alkatrész legyen, egy tartólemez rögzíti a csavarhoz a szorítópofa két szélén. A tartólemez szerelés után egy záróanya miatt a csavaron marad.

Ezzel a konstrukcióval elértük a célunkat: a szárnyas anya meglazításával a szorítófej kifordítható, tehát a detektor könnyedén felhelyezhető a keretre. A szorító erőt hosszú szorítópofák adják át az epoxi falnak, eloszlatva a terhelést. Az első detektor rögzítése után, egy-egy próbaszálat kifeszítve a két szélre a POM rudak csavarásával könnyen és precízen beállítható a szálak helye. A keretet átfordítva a próbaszálak segítségével a második detektor bepozicionálható a megfelelő helyre.

3.3. Továbbfejlesztési lehetőségek

Az elkészült prototípus alapján felmerült egy gyakorlati probléma. A szorítópofák hajlamosak kifordulni a csavar alól, ez a későbbiekben kellemetlen lehet. Ez orvosolandó, javasolt a szorítópofába egy fészket marni a csavar végén lévő záróanya számára. Ezzel megszűnne a szorítófej kotyogása, de a funkcióját ugyanúgy ellátná.

A detektorok pozicionálásának megkönnyítésére érdemes megfontolni egy-egy igazító alkatrész beépítését. Hasonló elven működne, mint a szorítófejek, de a keret síkjával párhuzamos irányba fejtene ki erőt a detektorra.

Mint az már korábban említve volt, a POM rudak két részből állnak. Az érintkezésnél felmerülő gyakorlati probléma, hogy a menetek nem tökéletesen illeszkednek, emiatt a szálak megakadhatnak. Erre megoldásként javaslom szerelés után a felület utókezelését lakkozással vagy festéssel.

Végleges gyártás előtt következő lépés lesz a konstrukció állványának megtervezése. Az állvánnyal szemben egy praktikus igény (azon kívül, hogy elbírja a kapott terheléseket), hogy egy adott szögbe állítva a keretet, az rögzíthető legyen. Erre azért van szükség, mert így már az állványba helyezve rögtön sok munka elvégezhető a szálak felfeszítésén kívül (ragasztás, forrasztás stb.).

Végső fejlesztésként célom egy (8. ábrán látotthoz hasonló) automatizált száladagoló mechanizmus tervezése. Legfontosabb elvárások, hogy a szálak feszítése minél egyenletesebb legyen és a száltávolság állítható legyen nagyobb tartományokban is.

4. Szálfeszesség mérés

4.1. A vizsgálat célja

A sokszálas proporcionális kamrák gázterében kifeszített szálak feszessége fontos kérdés a detektorok működése szempontjából. A túl laza szálak hozzáérhetnek a katódlemezhez vagy egymáshoz, működésképtelenné téve a detektort, valamint növeli az esélyét a kisüléseknek, melyek kárt is okozhatnak. A szálak feszességét egyrészt a szállítás során kapott rázkódások gyengítik. Továbbá mivel a szálakon nagyfeszültség van, a Lorentz-erőből származó terhelés is jelentős.

Precízebb helyfelbontású detektoroknál a szálak akár egy milliméter távolságra is lehetnek, így felmerül egy olyan technikai kérdés, hogy hogyan lehetne leforrasztani a szálak végeit az elektronikai csatlakozásoknál, hogy azok ne érjenek egymáshoz. Egy lehetséges megoldás, hogy az anódszálak csak az egyik oldalon, a térformáló szálak pedig csak a másik oldalon legyenek forrasztva, a szálak túlsó oldalain pedig nem forrasztás, hanem ragasztó tartaná meg a szálakat.



11. ábra. Szálak forrasztásának és ragasztásának elrendezése.

A szálakat barázdált polimer száltartó tartja távol a katódlemeztől. A szálak aktív hossza detektortól függően 100 mm-től akár méteres hosszúságig is terjedhet, de a 200-400 mm a gyakori. A ragasztó a száltartókra kerül fel.

A vizsgálat célja meghatározni, hogy kétkomponensű epoxi ragasztó képes-e megtartani a szálak feszességét. A mérések során a hőmérséklet 10-35 °C között volt. Kézenfekvő lenne hosszútávú következtetéseket tenni az epoxi anyagok élettartamára a hőbomlás függvényéből, azonban ezeknek a folyamatoknak 60 °C felett van jelentősége. [8]

4.2. Mérési berendezés leírása

A mérőeszköz

A szálak feszességének mérését egy Wire Stretch Meter [9] (WSM) nevezetű műszerrel valósítottuk meg. A műszer lényegében berezonálja a szálat a rákapcsolt feszültség segítségével és méri a rezgés periódusidejét. A mért adatból az anyagjellemzők és geometriai paraméterek felhasználásával a feszítő erő

$$F = \frac{\pi \cdot \rho \cdot l^2 \cdot d^2}{T^2} \tag{4.2.1}$$

képlet segítségével számítható, ahol

- *F* : feszítő erő [N],
- ρ : szál sűrűsége $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$,
- *l* : aktív szálhossz [m],
- d : szál átmérője [m],
- *T* : periódusidő [s].

A mérendő szál egy permanens mágnes erőterében helyezkedik el. Egy mérőfejet csatlakoztatunk a szálhoz az aktív részen kívül, melyen keresztül elektromos impulzusokkal gerjesztjük, a túloldalon pedig leföldeljük. A műszer a visszakapott feszültségjelekből automatikusan illeszti a pulzusok frekvenciáját a szál sajátfrekvenciájához.

A műszer az 5-200 µm átmérőjű szálakra használható 50-4000 mm aktív hosszal. A mérési tartomány 0,5-65 ms, a mért periódusidő pedig 1% hibahatáron belüli.



12. ábra. A mérési folyamat.

A konstrukció

A berendezés vázát 10 mm × 10 mm keresztmetszetű üvegszálas epoxi rudak alkotják. A tetején két oldalt helyezkednek el a száltartók. A szálak 4 milliméterenként vannak kifeszítve. A száltartók tetején mindkét oldalon a különböző ragasztók tartják a szálakat (13. ábra).

A száltartók 6 mm széles és 1,6 mm vastag polimetil-metakrilát hasábok lézergravírozással barázdálva. A száltartók külső oldalain a szálak lazán vannak hozzáforrasztva a mérőés a földelt pontokhoz, tehát a mechanikai feszültséget kizárólag a ragasztók veszik fel. A mérendő szál alatt helyezkedik el a permanens mágnes.

A mérés során megvizsgáltam négyfajta ragasztót, TCPD detektoroknál használt kétféle összetételű és vastagságú szálat, az egyes szál fajták pedig két-két különböző kezdeti előfeszítő erővel lettek meghúzva ragasztás előtt. Minden előfeszítéshez három szál lett készítve. A paraméterek kapcsolatát a 1. táblázat reprezentálja.



13. ábra. A konstrukció felépítése.

A négy féle epoxi ragasztó:

- Uverapid 5 (továbbiakban: U5),
- Uverapid 20 (továbbiakban: U20),
- Soudal Araldite Extra Strong (továbbiakban: SA),
- Huntsman Araldite 2000+ 2014-1 (továbbiakban: HA).

Kétféle száltípus:

- Luma Sweden 24 μm átmérőjű, aranyozott volfrám szál (továbbiakban: t),
- 100 µm átmérőjű CuZn 37 EDM szál (továbbiakban: B).

A t-jelű szálaknál alkalmazott előfeszítések

- 15-20 g (továbbiakban: 20g),
- 25-30 g (továbbiakban: 30g),

a B-jelű szálaknál pedig

- 50-70 g (továbbiakban: 60g),
- 100-120 g (továbbiakban: 120g).

ragasztótípus											
t						В					
	20g		30g			60g			120g		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3

1. táblázat. Szálak paraméterei az adott ragasztótípusnál.

4.3. Mérési eredmények

Szálfeszesség az idő függvényében

A mért adat a periódusidő (T) milliszekundumban. (4.2.1) egyenlet alapján a feszítő erő a periódusidő reciprokának négyzetével arányos. Szemléletesebb eredményért vezessünk be egy dimenzió nélküli arányszámot, mely a kezdeti előfeszítő erőhöz képesti feszítőerőváltozást adja meg:

$$r = \frac{1}{(T/T_0)^2},\tag{4.3.1}$$

ahol T_0 a kezdeti előfeszítő erőhöz tartozó periódusidő.

A mérési eredmények a 14. ábrán láthatóak. Mivel a t és B szálak más-más tendenciát mutatnak, ezért külön ábrán vannak bemutatva. A diagram pontjai mellett az aktuálisan mért hőmérséklet is fel van tüntetve Celsius-fokban.

Amint azt az ábra jól szemlélteti, a szálak feszessége túlzottan függ a hőmérséklettől, akár 20%-os változás is felléphet nagyobb hőingások során, tehát célszerű az adatokat korrigálni.

A vékony és vastag szálak ellentétes tendenciájának magyarázata, hogy hőtágulási tényezőjük különböző, a volfrám szálé sokkal nagyobb, mint a réz-cink ötvözetű EDM szálé. Amikor csökken a hőmérséklet, az üvegszálas epoxi váz összehúzódik, míg a volfrám szál nem, tehát a vékony szálak meglazulnak. Az EDM szálnak viszont nagyobb a hőtágulási tényezője, mint a vázé, tehát hőmérséklet csökkenésre jobban összehúzódik, így a szál megfeszül.



14. ábra. Feszesség időbeli változása és a hőmérséklet az egyes mérések során.

Hőmérsékleti korrekció

Annak érdekében, hogy hőmérséklettől független eredményt kapjak, végeztem egy mérést több különböző hőmérsékleten (15. ábra). A hőmérsékleti tartomány 12-32 °C között mozog. A t és B szálak ismét külön diagramon vannak ábrázolva.

A szálfeszesség hőmérséklettől való függése lineáris, és az egyenes meredeksége az előfeszítő erőtől függ. A meredekség a pontokra illesztett lineáris trendvonalból határozható meg. Ennek segítségével (4.3.1) arányossági számot módosítsuk úgy, hogy adott (T) periódusidő mérésből vonjuk ki a hőmérséklet-változás és a meredekség szorzatát:

$$r' = \frac{1}{\left(\frac{T - (t - t_0) \cdot m}{T_0}\right)^2},\tag{4.3.2}$$

ahol

- r' : hőmérséklet-független feszültség változása,
- T : periódusidő [s],
- T₀ : előfeszítéshez tartozó periódusidő [s],
- t : hőmérséklet [°C],
- t_0 : előfeszítésnél mért hőmérséklet [°C],
- m: hőmérsékletfüggés meredeksége.

A hőmérséklet-független aránnyal ábrázolt eredmények a 16. ábrán láthatóak. Itt már nincs egyértelműen csökkenő tendencia, a mérési eredmények 3%-os mérési hibahatáron belül mozognak.

A vizsgálat eredményeiből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a ragasztók meg tudják tartani a szükséges kezdeti előfeszítéssel meghúzott szálakat.



15. ábra. Szálfeszesség a hőmérséklet függvényében.



- 23 -

Mérési eredmények validációja

Az egyenletes meghúzáshoz egyenáramú motorral hajtott tárcsáról adagoltam a vázra a szálakat, a motor nyomatékának ellentétes irányába húzva. A nyomatékokhoz tartozó meghúzási erőt ellensúlyokkal mértem ki (Előfesz.). Mérési hiba a motor egyenetlen nyomaték-képzéséből és a tárcsa csapágyának súrlódásából adódott. A WSM-mel mért feszítő erők (Szálfesz.) a (4.2.1) egyenlettel számíthatóak. A mérések összehasonlítását a 2. táblázat tartalmazza.

	Előfesz. [g]	Szálfesz. [g]	$d \; [\mu \mathbf{m}]$	<i>l</i> [m]	$\rho \left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right]$	$T_0 [\mathrm{ms}]$
B-60g	50-70	86	100	0,2	8 400	3,553
B-120g	100-120	114	100	0,2	8 400	3,100
t-20g	15-20	18	24	0,2	19 170	2,937
t-30g	25-30	29	24	0,2	19 170	2,200

2. táblázat. Mérési eredmények összehasonlítása, a szálak típusa és meghúzása szerint.

A táblázatban

- d: az adott szál átmérője,
- *l*: a szálak aktív hossza,
- ρ: szálak sűrűsége,
- T₀: a száltípus első méréshez tartozó periódusideje (három azonos paraméterekkel rendelkező szál mérésének átlaga).

Az előfeszítések relatív hibája viszonylag nagy, de a validációhoz elegendő, ha a szálfeszességek beleesnek a tartományba. A pontosság a szálfeszesség értékeknél fontosabb, mivel ezek megváltozására voltunk kíváncsiak. Az eredményekből látható, hogy a szálfeszességek beleesnek a tartományba egy kivétellel. Minden esetben megfigyelhető, hogy a szálfeszesség az előfeszítési tartomány felső határához esik közel, vagyis egy szisztematikus hiba léphetett fel a konstrukció készítése során. A B-60g szálak esetében is emiatt a hiba miatt léphetett túl a tartományon a szálfeszesség, nem pedig azért, mert rosszul mértünk, vagy hibás a fizikai modellünk. Tehát megállapíthatjuk, hogy a szálfeszesség mérésével valóban a szálakban ébredő húzófeszültségeket kaptuk.

5. GEM rétegek optikai minőség-ellenőrzése

5.1. A minőség-ellenőrző rendszer funkciója

TCPD foton detektorok

A 2. fejezetben említésre kerültek a sokszálas proporcionális kamrák és a GEM-alapú mikrostruktúrás detektorok. A kutatócsoportom detektorfejlesztéseinek egyik eredménye e két technológia előnyeinek ötvözése, mely UV fotonok detektálására is alkalmas. Ez a hibrid struktúra egy vastag GEM-ből (Thick-GEM, TGEM) és egy közelkatódos kamrából (Close Cathode Chamber, CCC) áll. A detektor áteresztő kell legyen az UV fotonokra, ezért a gáztér felül egy kvarcüvegből készült ablakkal van zárva. A beérkező UV fotonok elektronná történő konverziója a TGEM felső felületén történik, majd a TGEM rétegen történő áthaladás során a kezdeti kis jelet némileg (\sim 10×) felerősítjük. A CCC réteg feladata a jel további erősítése és kiolvasása (17. ábra) [10].



17. ábra. A TCPD detektor felépítésének vázlata. Egy UV fotonok áteresztésére alkalmas kvarcüvegből, egy katód szálsíkból, TGEM-ből és egy CCC rétegből áll.

A kibocsátott fotoelektron a legközelebbi TGEM lyukhoz sodródik, ahol a lyukon történő áthaladás során a nagy térerősség hatására kisebb elektronlavinát idéz elő. A szükséges erősítés sokkal mérsékeltebb, így nem keletkeznek szikrák, ami biztonságossá teszi a működését. A gerjesztett jel a szegmentált földelt katódon lehetővé teszi a pozícióérzékenységet, és a szálakról összegyűjtött jelek meghatározzák a kamrában generált töltésszámot. Vagyis pontos erősítési térképet (gain map) készíthetünk a TGEM-ről (18. ábra).



18. ábra. (Bal oldal) TCPD detektorral készített gerjesztési térkép. Segítségével megállapíthatjuk a hiba hatását a detektor működésére. (Jobb oldal) TGEM lemez egy lehetséges mikrostrukturális hibája [11].

A minőség-ellenőrzés célja a TGEM mikrostruktúrális hibáinak kiszűrése az erősítési térkép készítésével. Ez az elv vékony és TGEM-ek ellenőrzésére is működik. Az erősítési térkép segítségével megállapíthatjuk a lokális hibák hatását a detektor működésére.

Ilyen GEM alapú UV detektort eddig az amerikai PHENIX kutatóintézet HBD detektorában használtak háromrétegű GEM konfigurációban, Cserenkov-detektorként. További felhasználási cél a COMPASS és ALICE kísérletekhez a CERN-ben [10].

Leopard minőség-ellenőrző rendszer

A pásztázó műszer létrehozásának célja egy olyan konstrukció volt, mely képes végigpásztázni egy UV LED forrással a detektort, meghatározza az erősítési térképet és nagy felbontású képeket tud készíteni a TGEM felületéről, mellyel elvégezhető a TGEM lemezek minőség-ellenőrzése. Ennek a projektnek a neve Leopard [12]. A mérésekhez speciális, igen alacsony hullámhosszú UV fény kibocsátására képes LED forrásokat használunk (UVTOP 240 LED), melyet a Sensor Electronic Technology cég gyárt [13]. A LED-ek 130 kHz frekvenciájú pulzáló jelet adnak. A jeleket megfelelően kell fókuszálni a detektorra, hogy pontos helyfelbontást kapjunk. Ezért a LED alatt egy optikai "tűlyukat" (pinhole, adott méréstől függően 150-500 µm közti átmérőjű) és egy fókuszáló (UV áteresztő) lencsét használunk. A szerkezet vázlata a 19. ábrán látható. A rendszerhez tartozik egy 500-szoros nagyításra képes USB-s digitális mikroszkóp kamera is.



19. ábra. Leopard optikai minőség-ellenőrzés elvi vázlata. Az optikai rendszer három dimenzióban mozgatható 2,5 μm pontossággal.

5.2. A rendszerhez tervezett részegységek



20. ábra. Leopard minőség-ellenőrző rendszer. A saját fejlesztésű egységek: váz, fal, az optikai rendszer tartóelemei és a pozicionáló.

A váz:

A szerkezet váza 40 mm × 40 mm zártszelvényű szerkezeti acélokból van összehegesztve. A váz befoglaló méretei 400 mm × 500 mm × 400 mm, melyből a léptetőmotorokkal bejárható hasznos tér 200 mm × 200 mm × 50 mm. A környezet rezgéseinek szigetelésére PVC talpak vannak rögzítve a lábak alján.

A fal:

A 21. ábrán láthatóak az optikai rendszer részegységei. Az egységek a falhoz vannak rögzítve, amik így mozgathatóak a térben. A fal vastagsága 5 mm, alumínium. A rögzítést M4 menetű furatok biztosítják. Négy sor furattal van ellátva a fal, mindegyik sorban 30 mm távolságonként egy-egy furat.



21. ábra. Leopard optikai rendszere közelről, az egyes részek megnevezésével.

Tartóelemek:

A tartóelemek funkciója, hogy rögzítsék az optikai elemeket a falhoz. Elvárás a tartókkal szemben, hogy szabadon pozicionálhatóak legyenek a falon függőleges irányban. Megoldásként 4 mm vastag L profilú alumínium hasábokat terveztem. A rögzítő lapján két-két párhuzamos kimaráson keresztül rögzítik a csavarok a tartót. Így a kimarások mentén szabadon pozicionálható a profil és a legközelebbi furatban rögzíthető. A másik lapjára kerülnek az optikai elemek. Ezek rögzülését a tartóhoz négy darab négyzet alakban elrendezett menetes furat biztosítja. A profilok a rögzítő lapjukkal felfelé vagy lefelé is tetszőlegesen rögzíthetőek, attól függően, hogy hogyan férnek el jobban.

A fókuszáló LED pozicionálása:

A legfontosabb alkatrész a LED pozicionáló. Ennek feladata, hogy a LED-et mereven tartsa és egyben állítható legyen a helyzete legalább 2-2 mm tartományban. Erre azért van szükség, hogy a LED-et pontosan a pinhole fölé tudjuk pozicionálni, így a lehető legnagyobb fotonhozamot érjük el a detektorban.

A kivitelezésre 3D nyomtatott bakelit alkatrészeket terveztem. Ezek tervezésénél fontos kritérium, hogy nyomtathatóak legyenek. A felhasznált 3D nyomtató (Ultimaker 2) rétegező elven működik, vagyis a kívánt alakot rétegről-rétegre anyaghozzáadás útján hozza létre. A

modellezésnél tehát arra kell figyelni, hogy ne legyenek túl nagy kitüremkedések, meredek áthidalások, vagyis többnyire alulról felfele szűkülő legyen. Azonban 10°-os vagy kisebb kihajlások, valamint furatok még nyomtathatóak.

A pozicionáló méreteinél figyelembe kell venni, hogy a LED 10 mm átmérőjű és az eszköz el kell férjen a $40 \times 40 \text{ mm}^2$ felületű tartóelemeken.

5.3. A LED pozicionáló egység

Az első iteráció

A megoldás egy három tokból álló rendszer, melyben a középső tok végzi az első, a belső tok a második tengely irányú lineáris mozgatást (22. ábra). A külső tok mereven rögzül az alaplemezhez, és ez vezeti meg a középső tokot. A középső tokot egy a külső tokon menettel átmenő pozicionáló csavar tolja. Az ellenerőt a túlsó oldalról egy nyomórugó fejti ki. Hasonló a kapcsolat a középső és a belső tok közt, mely a belső tokot a második tengely irányába mozgatja.

A LED a belső tokba van rögzítve, a fényt az alaplemez síkjára merőlegesen kifelé sugározza. A pozicionáló csavarok állításával a fókusz a középponttól minden irányba 3 mm-t mozdulhat el. A középső tokon behajtott csavar számára a külső tokon egy ablak biztosítja a szabad mozgást. A LED az alaplemezhez elektronikus csatlakozókkal kapcsolódik, melyek számára az eszközben egy kábelcsatorna lett kialakítva. Ez úgy lett kivitelezve, hogy a belső tok kisebb magasságú, és a középső tokok belső oldalán kialakított síneken tud mozogni, így elég hely szabadul fel a csatlakozóknak.

Fedélként egy $40 \times 40 \text{ mm}^2$ -es alumíniumlemez szolgál, mely a csavarfuratokon keresztül rögzíti az eszközt a tartólemezhez.



22. ábra. A pozicionáló műszer első iterációjának ábrája, az elemek megnevezésével és a fontosabb méretekkel. A belső tok rögzíti a LED-et, mely a síkjában minden irányban 3 mm-t pozicionálható.

A második iteráció

Az eszköz működtetése során azt tapasztaltam, hogy a LED csatlakozói nem elég rugalmasak a pozicionáláshoz, a fókusz csak a kívánt tartomány felénél üzemelt megfelelően. Ennek megoldására a LED csatlakozását az alaplemezhez közvetlen csatlakozó helyett rugalmas kábelekkel oldottam meg. A kábeleket egy a belső tokhoz ragasztott csatlakozóhoz forrasztottam.

Az első prototípus használata során felmerült az igény, hogy a LED-ek könnyen cserélhetőek legyenek. Ezért a belső tokot két részre bontottam: a felső rész merevíti a LED-et az alsó részhez, melyben a csatlakozók találhatóak. Az alsó rész továbbra is ugyanúgy pozicionálható, mint az első iterációban (most már a teljes tartományon a kábeleknek köszönhetően). A LED tok csavarokkal rögzül a belső tokhoz, a fényforrások cseréjéhez tehát elég ezt az egy alkatrészt leszerelni. Így viszont már nem volt megoldható az alkatrészek megvezetése egy fedéllel, ezért külön fedele van a külső toknak, mely csak a középső tokot, a belső tok fedél pedig a belső tokot vezeti meg.

A változtatások alkalmazásával a konstrukció már megfelel a követelményeknek. A LED tokot rögzítő csavarok oldásával könnyen cserélhető a fényforrás, ugyanakkor megmaradt a merevség. A pozicionáló csavarok menetemelkedése 0,5 mm, vagyis egy teljes körülfordulással egy irányban ennyi az elmozdulás. Az eszköz kotyogása 5° körüli, tehát a pozicionálás

$$0,5\ mm\cdot\frac{5^{\circ}}{360^{\circ}}\cong 0,01\ mm,$$

vagyis 10 µm körüli pontosságú. Mivel a pinhole 100 µm-nél nem szokott kisebb lenni, így a fókusz és a pinhole fedésében $10 \times 5^{\circ} = 50^{\circ}$ játék van, melyet kézzel be lehet állítani. A pozicionáló csavarok menetén a szélső helyzetek és a kezdeti függőleges helyzet jelölve van, valamint a külső tok ablakából a középső tok falán rovátkák láthatóak, így könnyen megállapítható a pozicionáló aktuális helyzete.



23. ábra. A pozicionáló műszer második iterációjában a nyomtatott elemek robbantott ábrája. A fényforrást a LED tok rögzíti a belső tokhoz, mely a síkjában minden irányban 3 mm-t pozicionálható.

6. Összefoglaló

Szakdolgozatom elkészítése során lehetőségem nyílt bekapcsolódni a gáztöltésű detektorok kutatásával és fejlesztésével foglalkozó REGARD csoport (MTA Wigner FK, Innovatív Detektorfejlesztés csoport) munkájába. A 2. fejezetben ismertettem a részecskedetektorok főbb típusait, részletesebben érintve a gáztöltésű detektorokat.

Munkám során terveztem és építettem egy szálfeszítő berendezést, mely sokszálas detektorok építésére használható. A keret tervezése előtt több kamra építésében is részt vettem, ami segített az építésnél felmerülő problémák megismerésében és így a keret tervezésében. A keret segítségével a kamrák építése egyszerűsödött, gyorsabb és precízebb lett.

Kifejlesztettem egy mérési módszert a szálak feszességének ellenőrzésére. Mérésekkel számszerűsítettem a kétkomponensű epoxi ragasztóval rögzített szálak feszességének változását az idő függvényében. Két hónap adatai alapján igazoltam, hogy az alkalmazott ragasztók megfelelnek a követelményeknek és hosszú távon alkalmazhatóak (lásd a 16. ábrán).

Dolgozatom utolsó fejezetében bemutattam a REGARD csoport által épített minőségellenőrző berendezést, a Leopard detektort, amelyet a TGEM-ek fotonhozam és erősítési térképeinek meghatározására alkalmazunk. Továbbá ismertettem az általam fejlesztett eszközöket, amelyekkel növelhettük a mérések megbízhatóságát, precizitását.

7. Summary

During the creation of this thesis I had the opportunity to take part in the work of REGARD group (MTA Wigner FK) concerning the innovation and development of gaseous detectors. In Chapter 2, I discussed the main types of particle detectors, with special attention to gaseous detectors.

I developed and built a frame for wire stretching which was used in the creation of multiwire proportional chambers. Before the design I took part in the construction of multiple detectors to understand the arising problems. The new frame helps us to build detectors precisely, in a more simple and faster way.

I developed a measuring method to supervise the stretch of the wires. I made calculations to determine the change of the wire stretch of two component epoxy glues. The data from a two month long measurement proved that the used glues can stand the proof (Fig. 16).

In the last chapter I introduced a quality control system, the Leopard, made by the REGARD group, which is used to determine the photon yield and the gain map of TGEMs. Furthermore, I presented several new Leopard units developed by myself. These items improve the reliability of the system and allow measurements with higher precision.

8. Hivatkozások

- [1] Kiss G: "Innovatív gáztöltésű detektorok közvetlen és szimulációs vizsgálata",
 MSc Diplomamunka, ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék (2012) 3, 4, 6
- [2] F. Sauli: "Gem: A new concept for electron amplification in gas detectors", Nucl. Instr. and Meth. A, vol. 386, issues 2-3, (1997) 4
- [3] Ch. H. Hahn (KR), I. Kim (KR), W. Kim (KR), J. Yu (US): "Apparatus for digital imaging photodetector using gas electron multiplier",
 United States, Patent application publication, US 2008/0283725 A1 (Nov. 20, 2008) 5
- [4] D. Varga, G. Hamar, G. Kiss: "Asymmetric Multi-Wire Proportional Chamber with reduced requirements to mechanical precision", Nucl. Instr. and Meth. A 648, p 163-167, (2011) 6
- [5] D. Varga, G. Kiss, G. Hamar, Gy. Bencédi: "Close cathodechamber: Low material budget MWPC",
 Nucl. Instr. and Meth. A 698, p 11-18, (2013) 7
- [6] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, D. Varga: "Close Cathode Chamber technology for cosmic particle tracking",
 24th European Cosmic Ray Symposium, Kiel, proceedings (2014) 7
- [7] D. Varga, Z. Gál, G. Hamar, J. S. Molnár, É. Oláh, P. Pázmándi: "Cosmic Muon Detector Using Proportional Chambers",
 European Journal of Physics, submitted (2015) 8
- [8] H. Stutz: "Lifetime Assessment of Epoxies by the Kinetics of Thermal Degradation", Polymer Research Division, GKR-B1, BASF AG, D-67056 Ludwigshafen, Germany, (2003) 16
- [9] L. Lohonyai: "Wire Stretch Meter, Model WSM-660, User Manual", KFKI Budapest, (1995) 16

- [10] D. Varga, G. Hamar: "TCPD, a TGEM based hybrid UV photon detector", Journal of Instrumentation 8, (2013) 25, 26
- [11] G. Galgóczi: "Development of Micropattern Gaseous Detectors", talk at 15. Zimányi Winter School on Heavy Ion Physics, (2015) 26
- [12] G. Hamar, D. Varga: "High resolution surface scanning of Thick-GEM for single photoelectron detection", Nucl. Instr. and Meth. A 694, p 16-23, (2012) 26
- [13] <www.s-et.com> <http://www.s-et.com/spec-sheets/240nm-with-images.pdf> 27