Föld alatti üregek vizsgálata kozmikus részecskék segítségével

Tudományos Diákköri Dolgozat

Oláh László^{*} I. Fizikus MSc hallgató ELTE TTK

Témavezetők:

dr. Barnaföldi Gergely Gábor MTA KFKI RMKI Elméleti Fizikai Főosztály

dr. Varga Dezső ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Budapest, 2011.

*lolah@rmki.kfki.hu

Tartalomjegyzék

Be	evezetés	1
1.	Kozmikus sugárzás alkalmazott kutatásokban 1.1. Beitett kamrák keresése a gízai piramisokban	3 3
	1.2. A vulkáni tevékenység vizsgálata Japánban	5
	1.3. Nemzetvédelmi alkalmazás az Amerikai Egyesült Államokban	6
	1.4. A mexikói Nap Piramis feltérképezése Teotihuacanban	8
2 .	A kísérleti berendezés szerkezete és működése	10
	2.1. Az új fejlesztésű CCC kamra felépítése	12
	2.2. A kamra gázrendszerének működése	14
	2.3. A CCC kamra elektronikája	15
	2.4. A kiolvasott adatok struktúrája	17
	2.5. A detektor szerkezeti felépítése	19
3.	A kamrák analóg jeleinek vizsgálata	20
	3.1. A CCC kamra gázerősítésének vizsgálata	20
	3.2. Az optimális gázáramlás meghatározása	22
4.	A detektor kamrák tesztelése	25
	4.1. Az események kiválogatása – cluster keresés	27
	4.2. A detektor kamráinak pozicionálása	28
	4.3. A detektor kamráinak hatásfoka	30
	4.4. A detektor szögfelbontása	32
5.	A kozmikus müonok vizsgálata a detektor segítségével	37
	5.1. A müon-események között eltelt idők eloszlása	37
	5.2. Beérkező müonok számának napszakfüggése	39
	5.3. A kozmikus müonok szögeloszlása	40
	5.4. Olomtorony müon leképezése	42

6.	Müon leképezés a Jánossy-féle aknában6.1. Müonhozam mérés a Jánossy-féle aknában6.2. A kozmikus müonok szögeloszlása a Jánossy-féle aknában	44 46 47
7.	Összefoglalás	50
Kö	iszönetnyilvánítás	51
А.	$^{90}{ m Sr}~eta$ forrás útjába helyezett testek árnyéka	55
в.	Kozmikus müonok energiavesztesége anyagon való áthaladása során	57

Ábrák jegyzéke

1.	Kozmikus részecskezápor.	1
2.	A Khepren piramis Belzoni kamrájában összeállított detektor szikrakam-	
	rákkal és szcintillátorokkal	4
3.	A detektor elhelyezkedése az Asama-vulkán térképén. A bal alsó sarokban	
	a kis fényképen látható az ECC detektor, amely vas lemezekből és emul-	
	ziós rétegekből épül fel. A fehér vonal A és B referencia pontok között	
	párhuzamos a detektor szélével. A fekete szaggatott vonalak a régi krátereket	
	jelölik, amelyeket részben már betemetett a láva.	5
4.	Egy teherautó átvilágítása kozmikus müonok segítségével	6
5.	Az acél szorítóról és az ólom "LANL" betűkről készített müonfelvételek	7
6.	A Nap piramisa	8
7.	Sokszálas kamra a CERN LEP egy kísérletében [9]	11
8.	A CCC kamra vázlatos rajza felülnézetben	13
9.	A CCC kamra gázrendszerének felépítése	14
10.	A CCC kamra és a kiolvasó rendszer blokkvázlata	16
11.	A térformáló szálak közös kivezetésének végén megjelenő jelalakok az oszcil-	
	loszkóp 1-es csatornáján láthatóak (sárga görbék). A 2-es csatornán látható	
	a $300-400$ ns széles kapujel (CAMAC GATE), amelyet Trigger Egység küld	
	a CAMAC ADC-nek (<i>kék vonal</i>). A 3-as csatornán az impulzus-szerű trigger	
	jel látható, amelyre a jel kiolvasása elkezdődik (<i>rózsaszín vonal</i>)	17
12.	A "mérés.ebe" kiterjesztésű fájl szerkezete, 2 kamrával történő mérés esetén.	18
13.	A detektor összeállítás három CCC kamrával.	19
14.	Az analóg jelek mért töltéseloszlása 850 V és 1000 V érzékenyszál feszült-	
	ségeknél	20
15.	A különböző érzékeny szál feszültségértékeknél megmért a töltéseloszlás hisz-	
	togramok átlaga és mediánja. Azok aránya látható a feszültség fügvényében.	21
16.	A különböző érzékeny szál feszültség értékeknél mért gázerősítés	22
17.	A kamrán lévő átlagos össztöltés változása az idő függvényében elzárt gáz	
	esetén. Az átlagos össztöltés logaritmikus skálán lineárisan csökken	23
18.	A kamrán lévő átlagos össztöltés változása az idő függvényében a gáz meg-	
	nyitása után. Az átlagos össztöltés logaritmikus skálán lineárisan nő	24

19.	A CERN Proton Syncrotron gyorsító 5 GeV energiájú pionnyalábjában	
	(piros nyíl) elhelyezett kísérleti összeállítás.	26
20.	Å detektorra közel merőlegesen érkező 5 GeV energiájú pion nyaláb	26
21.	Az clusterméretek gyakorisága a pad és érzékeny szál egységekben	27
22.	A müontomográf kamráinak pad egységben megadott eltéréseinek hiszto-	
	gramjai. A felső 3 hisztogram mutatja a korrekció előtti átlagos eltérések	
	gyakoriságát. Az alsó 3 hisztogramon pedig az korrekció után megadott	
	átlagos eltérések gyakorisága látható.	28
23.	A kamrákhoz tartozó, pad egységekben megadott átlagos eltérések nagysága	
	az első korrekció előtt (<i>piros négyzetek</i>), az első korrekció után (<i>sárga három</i> -	
	szögek) ill. a második korrekció után (fekete pontok).	29
24.	A kamrákhoz tartozó, pad egységekben megadott helyfelbontások nagysága	
	az első korrekció előtt (<i>piros négyszögek</i>) és az első korrekció után (<i>sárga</i>	
	háromszögek).	30
25.	A 7 kamrás elrendezés (<i>kék háromszögek</i>) és a 3 kamrás müontomográf (<i>fekete</i>	
	pontok) hatásfoka	31
26.	A detektoron θ zenitszögben keresztülhaladó kozmikus müon pályája (<i>piros</i>	
	nyíl) ill. a koordináták ΔX_f és ΔX_a bizonytalanságából adódó $\theta - \Delta \theta$	
	minimális (zöld nyíl) és $\theta + \Delta \hat{\theta}$ maximális (kék nyíl) zenitszögekhez tartozó	
	részecske pályák.	32
27.	A részecske valódi és mért pályájának zenitszögei közötti különbségek gyako-	
	risága 4 cm-es kamra távolságok esetén. A zenitszögek közötti különbségek	
	gyakorisága normális eloszlást követ.	34
28.	A szögfelbontás változása a kamrák távolságának növelésével	35
29.	A szögfelbontás változása a felső és középső kamra távolságának növelésével.	36
30.	A müon-események között eltelt idők exponenciális eloszlása. Az eloszlás	
	jobb szemléltetéséért 1 ms széles "bineket" választottam	38
31.	A müon-események között eltelt idők eloszlását logaritmikus skálán ábrá-	
	zolva látható, hogy az eloszlás lineárisan csökken, tehát exponenciális elosz-	
	lást követnek az események közötti időkülönbségek.	38
32.	A müon-események számának időbeli eloszlása. Jól látható, hogy az óránként	
	beérkező müonok száma nem mutat néhány %-nál nagyobb eltérést. Tehát	
	a napszakok váltakozása elhanyagolható a müon-események szempontjából.	39
33.	A münok pad irányú zenitszögének eloszlása	40
34.	A münok pad és érzékenyszál irányú zenit-szögének eloszlása pad egységek-	
	ben megadva	41
35.	Az ólomtömbökből építetett torony fényképe (bal oldali ábra) és a 4 cm \times 8	
	${\rm cm} \times 35~{\rm cm}$ méretű ólomtorony leképezése kozmikus müonokkal (jobb oldali	
	ábra).	42
36.	Az ólomtorony pad (bal oldali ábra) és érzékeny szál (jobb oldali ábra)	
	irányban mért relatív intenzitása. A relatív intenzitás kb. 10 %-ot csökken	
~ ~	az ólomtorony helyén	43
37.	A detektor felett átlósan 45°-ban elhelyezett ólomtorony müon leképezése.	43

38.	Kísérleti berendezésünk a Jánossy-féle akna -1. szintjén.
39.	A Jánossy-féle akna Ny-K irányú metszete
40.	Müonhozam mérés a szcintillációs számlálóval (<i>piros keresztek</i>), a müonto- mográffal (<i>kék keresztek</i>) és irodalmi adatok (<i>fekete keresztek</i>). A kozmikus müonok hozamának csökkenése a két mérési összeállítást használva közelítő-
	leg megegyezik
41.	A Jánossy-féle akna -1. szintjén mért zenitszög eloszlások a detektor 0°-os pozíciójában.
42.	A Jánossy-féle akna -1. és -3. szintjén mért zenitszög eloszlások a detektor 45°-os pozíciójában.
43.	Az alumínium tömb árnyéka a detektor legfelső kamráján oldal ill. felül- nézetből
44.	A csavarokkal kirakott "ELTE" betűk, és azok árnyéka a detektor legfelső kamráján.
45.	A kozmikus müonok Bethe-Bloch görbéje különböző anyagokra [31]

Bevezetés

Földünket folyamatosan bombázzák nagyenergiájú részecskék. Ezek jórészt protonok, amelyek kölcsönhatva a légkör felső rétegeivel; részecskezáporokat generálnak, amelyekben főleg pionok keletkeznek. A semleges pionból (π^0) két foton (γ) keletkezik, amelyek gyengén áthatoló elektromágneses záporokat keltenek (e^-, e^+, γ). A töltött pionok (π^{\pm}) müonokra (μ^{\pm}) és neutrínókra (ν) bomlanak: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}, \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu_{\mu}}$. A müonok átlagos élettartama $\tau_{\mu} = 2, 2 \, \mu s \, [1]$, amely a klasszikus kinematikában azt jelentené, hogy a fénysebességgel haladó müonok maximum 660 m távolságra juthatnak el. Azonban a fénysebességgel haladó részecskék a relativisztikus kinematikának megfelelően mozognak, ezért az idődilatáció következtében eljutnak a Föld felszínére is ($\sim 20 \, \text{km-t}$ megtéve).



1. ábra. Kozmikus részecskezápor.

A Föld felszínére függőlegesen ($\vartheta = 0^{\circ}$ zenitszögben) érkező müonok $100 \,\mathrm{m}^{-2} \,\mathrm{sr}^{-1} \,\mathrm{s}^{-1}$ intenzitásúak és jó közelítéssel néhány GeV átlagos energiával rendelkeznek. A müonok energiát adnak le miközben keresztülhaladnak a légkörön vagy más anyagokon. Ezért a

felszínen mért intenzitás ismerete lehetőséget biztosít számunkra: a földfelszín alatt elhelyezett detektorba érkező részecskék számából és irányából következtethetünk a detektor feletti anyag eloszlására.

A kozmikus részecskék tulajdonságainak mérésére napjainkban többek között gáztöltésű detektorokat, sokszálas proporcionális kamrákat (Multiwire Proportional Chamber, MWPC) vagy néhány esetben emulziós ködkamrákat (Emulsion Cloud Chamber, ECC) alkalmaznak. A detektortechnika fejlesztése érdekében CERN-es kezdeményezésre 2009-ben létrehozták az RD51 kollaborációt, amely összehangolt munkát, információáramlást és közös platform létrehozását tűzte ki célul. Az alapítótagok között találhatjuk az Eötvös Loránd Tudományegyetemet és az MTA KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézetet is. A két magyar intézet együttműködéséből 2009 szeptemberében létrejött a REGARD (RMKI ELTE GAseous detector Research and Development) csoport, amely gáztöltésű detektorok kutatásával és fejlesztésével foglalkozik.

Dolgozatom elkészítése során lehetőségem nyílt bekapcsolódni a REGARD csoport munkájába. Célunk egy olyan detektor kifejlesztése és megépítése volt, amely segítségével megmérhetjük a beérkező kozmikus müonok számát, a beérkezési szögüket, ezáltal következtethetünk a detektor feletti anyag eloszlására. Ezzel az eljárással aztán kimutatható, pl. ha üreg található a detektor felett. Az általunk épített detektorhoz 3 db Közeli Katódú Kamrát (Close Cathode Chamber, CCC) használunk, amelyeket Varga Dezső és Hamar Gergő tervei alapján készítettük el. Ezek a kamrák 2 dimenzióban érzékenyek, azaz már 2 kamra alkalmazásával meghatározhatjuk a rajtuk keresztülhaladó müonok térbeli irányát, eloszlását. A detektor kamráihoz elkészítettük a jelek kiolvasására alkalmas elektronikákat, amelyekkel lehetőség van egy időben történő analóg és digitális jelkiolvasásra is. A feladatom az volt, hogy a detektor építésével párhuzamosan megírjam a kamrák jeleit analizáló programot. A detektor tesztelésének céljából méréseket végeztünk az MTA KFKI RMKI Gázdetektor Laboratóriumában és a CERN Proton Synchrotron gyorsítójában. Továbbá a detektor alkalmazhatóságának demonstrálására kialakítottunk egy mérőhelyet a KFKI területén található Jánossy-féle aknában, ahol további méréseket végeztünk el. A mérések kiértékeléséhez szükséges elemző programok megírását és az adatok kiértékelését én végeztem el.

Tudományos Diákköri Dolgozatomat történeti bevezetővel kezdem. Dolgozatom második fejezetében bemutatom a kamraépítés folyamatát, a gázrendszer működését, a CCC kamrákhoz tartozó elektronikát, a mérési adatok struktúráját és a kamrákból összeállított detektor szerkezetét. A harmadik fejezetében ismertetem a detektor kamráinak tesztelését, amelyet az MTA KFKI RMKI Gázdetektor Laboratóriumában végeztünk el. A negyedik fejezetében ismertetem a detektor tesztelését a CERN PS gyorsítójában illetve az MTA KFKI RMKI Gázdetektor Laboratóriumában, továbbá a közlöm tesztek eredményeit. Az ötödik fejezetében bemutatom a kozmikus müonok vizsgálatának céljából végezett méréseket. Végül, a dolgozatom utolsó fejezetében közlöm a Jánossy-féle aknában történő mérések kiértékelésének eredményeit és azokból levont következtetéseimet.

1. Kozmikus sugárzás alkalmazott kutatásokban

Már a XIX. század végén sokan vizsgálták az ionizáló sugárzásokat, többek között H. Becquerel, W. C. Röntgen és a Curie házaspár. Egy érdekes probléma volt pl. az elektroszkóp töltésének csökkenése, amelyet sugárzó anyag hiányában is megfigyelhettek. Ezt egy ismeretlen eredetű sugárzás jelenlétével magyarázták. A kozmikus sugárzás létezésének kísérleti igazolását V. Hess végezte el 1912-ben: légballonnal juttatott fel a légkörbe (5350 m tengerszint feletti magasságig) egy elektroszkópot és annak kisülését vizsgálta különböző magasságokon [2].

A XX. század második felében már kellően ismertté váltak a kozmikus részecskék tulajdonságai ahhoz, hogy vizsgálatuk eredményeként a megismert sugárzást alkalmazott kutatásokban is felhasználják. Az első alkalmazás E. P. George és munkatársai nevéhez köthető, akik az ausztrál hegyekben található hórétegek vastagságát próbálták megmérni [3]. Azóta számtalan további alkalmazás született, kezdve járatok keresésétől történelmi építményekben [4, 5], vulkáni tevékenységek folyamatos vizsgálatán át [6], a nemzetvédelmi megvalósításokig [7]. Tekintsünk ezek közül néhányat az alábbiakban.

1.1. Rejtett kamrák keresése a gízai piramisokban

A Keopsz által i.e. 2580-2530 körül építtetett Nagy Piramis belsejének feltárásával, a IX. században al-Mamún kalifa próbálkozott meg először. Később a XIX. század elején kutatók lőporral robbantottak lyukakat a Khepren Piramisban, annak reményében, hogy kincsekkel teli, titkos kamrákat találnak meg. Ezek a próbálkozások nem jártak sikerrel, ráadásul nagy kárt okoztak a piramisokban is. Az első jelentős kozmikus mérések a gízai piramisok feltárásával kapcsolatosak.

1965-ben merült fel az ötlet, hogy a kozmikus részecskék vizsgálatára épített berendezéseket használjanak régészeti feltárások segítésére ezeknél a piramisoknál. A Piramis Programot 1966 június 14-én Luis W. Alvarez és csoportja indította el [4]. Következő év tavaszára a Khepren Piramisban található Belzoni Kamrában felépítettek egy kozmikus részecske detektort. A Belzoni kamra felett még további kamrák jelenlétét feltételezték, ezeket szerették volna megtalálni a detektor segítségével.

A 2. ábrán látható a kísérleti berendezés, amely két egymástól 30 cm-re lévő 1,8 m × 1,8 m felületű szikrakamrából áll. Felettük és közöttük egy-egy, az alsó alatt pedig két szcintillációs számláló volt elhelyezve. A berendezés segítségével nagy pontossággal lehetett megmérni a müonok beérkezési szögét. A két alsó szcintillátor között 1,2 méter vastagságú vas réteg volt, amely minimálisra csökkentette a beérkező müonok másodlagos szórásának hatását a piramis anyagának jelentős részét alkotó mészkőben. A piramistól néhány száz méterre helyezkedett el a konténerlaboratórium az adatrögzítő készülékkel. A mérések során mintegy egymillió eseményt vettek fel. Néhány hónap után, a piramis térfogatának 19 %-át sikerült feltérképezniük. Közel fél éves adatgyűjtés után, pedig már látható volt a piramis négy sarka és külső jellegzetességét adó mészkő "sapka" is. Továbbá, egyértelműen sikerült meghatározniuk, hogy a piramisban található két kamrán kívül nincsenek további ~ 2 m-nél nagyobb méretű üregek.



2. ábra. A Khepren piramis Belzoni kamrájában összeállított detektor szikrakamrákkal és szcintillátorokkal.

1.2. A vulkáni tevékenység vizsgálata Japánban

A következő érdekes mérést H. Tanaka és munkatársai végezték el a vulkáni működés jobb megismerése érdekében [6]. A vulkánok belső szerkezetének ismerete fontos ahhoz, hogy megértsük azok működését és előrejelezzük a következő kitörés jellegét. A múltbéli kitörések elemzésével párhuzamosan elindultak a kísérletek a vulkánok belső szerkezetének feltárására is. Elsőként hagyományos geofizikai módszereket használva, mint a mélyfúrás vagy a szeizmikus tomográfia, sikerült is eredményeket elérni. Egy aktív vulkán dinamikáját különféle tényezők határozzák meg: a benne található magma kémiai összetétele, benne lévő gáz mennyisége, magassága és a magmát összegyűjtő medence mérete, a magmavezető rendszer geometriája, és a vulkán szerkezetének fizikai jellemvonásai. A hagyományos módszerek alkalmazhatóságának határt szab a térfelbontás, amely skálája néhány 10 m-től akár 1 km-ig is terjed [8]. Ennek ismeretében jó ötletnek adódik az aktív vulkánok belső szerkezetének feltérképezésére müonokkal, hiszen jobb felbontás érhető el vele, mint hagyományosan. Ennek nyomán a belső szerkezet meghatározásának fontos eszközévé nőtte ki magát a müon tomográfiás módszer.

Japánban H. Tanaka és csoportja végzett kísérleteket ezzel a módszerrel az Asama-vulkánnál 2003 és 2007 között. Tanakáék egy emulziós ködkamrát (Emulsion Cloud Chamber, ECC) helyeztek el a vulkán krátertől 1 km-re egy 1 m mélységű üregbe (lásd 3. ábra). Azt várták, hogy képet kapnak a vulkán belső szerkezetéről és a benne található anyag sűrűségének eloszlásáról a rajta keresztülhaladó illetve a benne elnyelődő müonok segítségével.



3. ábra. A detektor elhelyezkedése az Asama-vulkán térképén. A bal alsó sarokban a kis fényképen látható az ECC detektor, amely vas lemezekből és emulziós rétegekből épül fel. A fehér vonal A és B referencia pontok között párhuzamos a detektor szélével. A fekete szaggatott vonalak a régi krátereket jelölik, amelyeket részben már betemetett a láva.

A különböző irányból érkező müonok nyomait a detektor emulziós rétegeiben 3 dimenziós leképező technikával elemezték. Így információt kaptak azoknak a részecskéknek az energia elnyelődéséről, amelyek keresztül haladtak a csúcsnál található kráteren. A berendezés tipikus szögfelbontása 10 mrad volt. Ezzel a berendezéssel a mérések alkalmasak voltak azon oldalak a kőzetrétegeinek a tanulmányozására is, amelyek nehezen megközelíthetőek, és ezért a szerkezetük nem volt meghatározható a hagyományos szeizmikus vagy elektromágneses módszerekkel. Méréseket végezve néhány száz méterrel a kráter alatt, észleltek egy sűrű réteget, amely összefügg a 2004-es kitörés során keletkező lávabuckával. A kis lávadomb alján jobbra találtak egy kevésbé sűrű régiót is, amely azt sugallja, hogy ott egy másodlagos kráter van. A sűrűséget 1-3% pontossággal adták meg, így ezzel a módszerekkel.

1.3. Nemzetvédelmi alkalmazás az Amerikai Egyesült Államokban

2001 szeptember 11-e óta az Amerikai Egyesült Államok kiemelten kezeli a terrorizmus elleni harcot, és minden eszközt felhasználva próbál megakadályozni egy újabb támadást. A kockázat mértéke és a rendkívüli következmények, amelyeket egy terrorcselekmény okozhat, motiválta az ország vezetőit, hogy ezt megelőző stratégiát dolgozzanak ki. Egyike a stratégiáknak, hogy folyamatos ellenőrzés alatt tartják nukleáris anyagokat és azok mozgásait. Ennek kontrollálására dolgozott ki eljárást egy amerikai kutatócsoport.



4. ábra. Egy teherautó átvilágítása kozmikus müonok segítségével.

A röntgenes átvilágítással, megvizsgálható egy teherautó rakománya és a szállító jármű is, így kimutatható esetleges rejtett nukleáris anyagok jelenléte. Az újabb röntgen letapogató berendezéseket már neutron szórással, ill. röntgen viszszaszórással is kombinálják, így hatékonyabbban észlelhetik a leárnyékolt, elrejtett stratégiai nukleáris anyagokat (Strategic Nuclear Material, SNM). A Los Alamosi Nemzeti Laboratóriumban L. J. Schultz és K. N. Borozdin irányításával egy hatékonyabb eszköz kifejlesztését kezdték el 2003-ban [7] (lásd 4. ábra). Felhasználva a kozmikus müonok anyagban történő többszörös szórását, passzívan is lehetséges detektálni kis mennyiségű, árnyékolt anyagokat, akár rövid idő alatt is, szétválasztva a nagy rendszámú anyagokat a nukleáris anyagoktól. Az alapos vizsgálat elvégezhető a jármű vezető jelenlétében is, mert itt nem alkalmaznak mesterséges forrást, amely károsíthatná az élő szervezetet.

A berendezés felépítése egyszerű: a müonok keresztülhaladnak két érzékelő detektoron, amelyeket a vizsgált tárgy felett helyeztek el. Így információt kapunk arról, hogy hol érkeztek be a részecskék és milyen szögben. A müonok továbbhaladnak a céltárgyon, ahol szóródnak az anyag méretétől és rendszámától függően. A szórt részecskék beérkezési helye és szöge megmérhető a tárgy alá helyezett további két detektor segítségével. A detektorok alá építhető be egy a lemezek és detektorok egymásra rétegzéséből álló kaloriméter, amely segítségével a vizsgált anyag összetétele és a vastagsága is mérhető. Ha két-két detektorból és lemezből készített réteget alkalmaztak, a lemezeken történő szórás mérésével következtethettek a müon impulzusára kb. 50 % bizonytalansággal. A triggert két szcintillátor koincidenciája adta. A detektorok a felbontása 400 mikron, a szöget körülbelül 2 mrad pontossággal tudták mérni. A detektor első tesztjeinél alkalmazott céltárgyak és a róluk készített "müonfelvételek" az 5. ábrán láthatóak.



5. ábra. Az acél szorítóról és az ólom "LANL" betűkről készített müonfelvételek.

A tárgyak felett és alatt egy-egy sávszerű folt jelent meg, ezek igazából a vékony falú acélgerendák, amelyek alátámasztják a mintatartó lemezeket. Az acélból készült c-alakú szorító (5a. ábra) közel azonos vastagságú volt mint az acélgerendák, ezért a képe is ugyanolyan sötét. Az ólom "LANL" betűk (5b. ábra) sokkal több müont nyeltek el mint az acélgerendák, így a gerendák intenzitása észrevehetően halványabb ezen a képen. Ezeknek a képeknek az előállításához körülbelül 100000 eseményt mértek. Egy jól beállított detektor rendszer képes közel ekkora adatmennyiség gyűjtésére 30 perc alatt, ha hatékonysága közel 100 % és nagy térszögben méri a részecskéket. Ezek a hosszú idejű mérések már tisztán mutatják a vizsgált anyag szerkezetét, azonban az egyszerű eldöntendő kérdések megválaszolásához sokkal kevesebb müon is elegendő. Ez, mintegy kamionméretű tárgy átvizsgálására szükséges idő, akár néhány perc is lehet. Az új technikával kimutathatóak a csempészett nukleáris anyagok egy határátkelőkre érkező járműben anélkül, hogy egészségügyi kockázata merülne fel.

1.4. A mexikói Nap Piramis feltérképezése Teotihuacanban

A mai napig a világ egyik legtitokzatosabb helye a Mexikóvárostól ÉK-i irányban, 40 km távolságra található Teotihuacan. A város nevét az aztékok adták, amely annyit jelent, hogy "a hely ahol az emberek istenné válnak". Az egyik legnevezetesebb helye a Nap piramisa (lásd 6. ábra), amely a második legnagyobb Latin-Amerikában. A Mexikói Állami Egyetem munkatásai 2007-től egy az Alvarezéhez hasonló módszerrel elkezdték feltárni a Nap piramisát [5]. Abban a szerencsés helyzetben voltak, hogy a Nap piramisban található egy alagút. Azonban a korábbi egyiptomi mérésekhez képest volt néhány lényeges eltérés: a piramis alakja, mérete és anyagi összetétele. A régészek azt remélték, hogy sikerül találni egy sírt vagy kincseskamrát a piramis belsejében.



6. ábra. A Nap piramisa.

A kísérleti berendezésüket két egyenként 1 m × 1 m felületű szcintillátor lemezből és hat darab sokszálas proporcionális kamrából (Multiwire Proportional Chamber, MWPC) építették fel. Ezzel az összeállítással a kezdetben az alapvető kísérleti paraméterek meghatározására koncentráltak, mint például az érzékenység, a felbontás, és a hatásfok. Ezek alapján meghatározták a helyi müon spektrumot, a piramis külső alakját és belső szerkezetét. A mérések eredményeképpen azt kapták, hogy nincs ~ 1 m-nél nagyobb üreg a piramisban.

Előbbiekből jól látszik, hogy a kozmikus müonok jól használhatóak a detektor feletti anyag struktúrájának meghatározására. A továbbiakban ezt az elvet szeretném felhasználni. Kutatócsoportunk egyik célja, hogy egy a felsoroltakhoz hasonló, ám azoknál jelentősen költséghatékonyabb, mobilisabb, infrastruktúrára, energiafelhasználásra és emberi felügyeletre nézve szerényebb igényű, a jelenlegiek precizitását meghaladó berendezést tervezzen, amely alkalmas pl. föld alatti üregek vagy kiterjedtebb kőzet-inhomogenitások keresésére és vizsgálatára.

2. A kísérleti berendezés szerkezete és működése

A nagyenergiás mag- és részecskefizika az anyag elemi alkotóit, közöttük létrejövő kölcsönhatásokat és azok előforduló állapotait vizsgálja. Ezeknek az alkotóelemeknek a különböző tulajdonságait az emberi érzékszervek behatárolt érzékelőképessége miatt nem tudjuk észlelni, ugyanis méretük és tömegük sokkal kisebb, sebességük pedig lényegesen nagyobb, mint azok a nagyságrendek amelyeket észlelni tudunk. A részecskék detektálásának elvi alapja mindig a részecskék ill. sugárzás és a detektor anyagának a kölcsönhatása (elsősorban elektromágneses kölcsönhatás). Amikor a részecske áthalad az anyagon, akkor ütközik az útjába kerülő atomokkal és ütközés során átadja nekik energiájának egy részét. Az ilven módon gerjesztett atomokat, vagy az áthaladáskor az atomokról leszakított elektronokat detektálni tudjuk. Ezen adatok ismeretében egy megfelelő detektorban a részecskék pályája mérhetővé válik. A mai detektorrendszerekben az azonosítást úgy végzik, hogy a beérkező részecskét több berendezés is megméri egymás után, különböző módszerekkel (az egyik a pályát határozhatja meg nagy precizitással, addig egy másik, a részecske sebességét mérheti meg igen pontosan). A mért adatok összevetésével kapott információ már elég az egyértelmű azonosításhoz. Az esetek többségében statisztikai eredményt kapunk, tehát sok részecske méréséből tudjuk meg, hogy mekkora volt az egyes részecskefajták aránya [9].

A mai detektorokban elterjedt módszer az ionizáció (atomi pályákról kiszakított elektronok) mérése. A detektor érzékeny térfogatában az elektronok könnyebb összegyűjtése érdekében nagy tisztaságú gázt alkalmaznak. A nagyenergiás részecskék gázdetektoron történő áthaladásukkor csak néhány száz elektront hoznak létre centiméterenként, ez a mennyiség még rendkívül kevés ahhoz, hogy egyáltalán képesek legyünk megkülönböztetni elektromos feldolgozórendszer háttérzajától. Ennek a problémának első sikeres megoldási kísérlete a H. Geiger és E. Rutherford által elkészített készülék, amelyet később W. Müller tökéletesített tovább és a Geiger-Müller-cső nevet kapta (1908). A berendezés lelke a középső, pozitív feszültségű anódszál, amely felé vándorolnak az elektronok. Maga az ötlet az, hogy a szál közelében kialakuló nagy elektromos térerősségben az elektronok annyira felgyorsulnak, hogy képesek lesznek újabb ionizációra. Majd az így keletkezett elektronok szintén felgyorsulnak, újabb ionizáció történik és így kialakul az elektronlavina, amely már egy jól mérhető töltést ad. A gyorsabb működés és a pontosabb ionizációmérés elérése erős motiváció volt továbbfejleszteni a jól működő Geiger-Müller-csövet. G. Charpak elkészített egy olyan kamrát (1968), amely elődjéhez képest kisebb feszültséget és több 20-30 mikron vastagságú szálat használ. Ezt az úgynevezett Sokszálas Proporcionális Kamrát (Multiwire Proportional Chamber, MWPC) elsősorban részecskepályák mérésére használják [11, 12]. MWPC-kben a lavina által elérhető erősítés tipikusan $10^4 - 10^5$. Egy részecske 1 cm-en kb. 100 elektront kelt, így a szálakon $10^6 - 10^7$ elektron jelenik meg, amely megfelelő erősités után alkalmas detektálásra. A mai detektorok (lásd 7. ábra) mérete eléri akár a néhányszor 10 métert is, amelyekben több tízezer párhuzamosan kifeszített, vékony drótszálból álló hálórendszer közelében alakul ki az elektronlavina.



7. ábra. Sokszálas kamra a CERN LEP egy kísérletében [9].

2009-ben az MWPC-hez hasonló koncepcióval, Varga Dezső tervei alapján megépült az első Közeli Katódú Kamra (Close Cathode Chamber, CCC) [10]. A berendezés 180 mm × 200 mm nagyságú, argon és széndioxid gázok keverékével töltött¹. A CCC kamra szálsíkjában 2 féle szálat alkalmazunk: 100 μ vastagságú úgynevezett térformáló szálak (Field Wire) és 20 μ vastagságú érzékeny szálak (Sense Wire)², amelyekről az analóg jel kiolvasható. A szálaktól kb. 1,5 mm távolságra elhelyezkedő katódot merőleges futású, 4 mm × 160 mm nagyságú parkettákkal (padekkel) szegmentáltuk, így CCC kamráink alkalmasak az egy időben történő digitális jelkiolvasásra akár két dimenzióban is. CCC kamráink legfontosabb tudományos előnyei az eddig használt gáztöltésű, sokszálas kamrákkal szemben, hogy könnyű szerkezetűek (~ 100-150 g tömegűek) és egyszerűen szerelhetőek, mivel toleránsabbak az apró (10-100 μ nagyságrandű) pontatlanságokkal szemben.

¹Tipikusan ezek a gázarányok: Ar: 80-90% és CO_2 : 10-20%.

²A magyar nyelvű szakirodalomban szokás ezeket jelszálaknak is nevezni.

2.1. Az új fejlesztésű CCC kamra felépítése

A kamrák építése során lehetőségem nyílt bekapcsolódni az ELTE és az RMKI együttműködéséből létrejövő, gáztöltésű detektorok fejlesztését és kutatását célúl kitűző REGARD csoport munkájába. A kamrákat magunk készítettük az ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája tanszékén és az MTA KFKI RMKI Gázdetektor Laboratóriumában. A kamrák építésének menete az alábbi fázisokra osztható fel:

- 1. Első fázis: A kamrák alapját képező nyomtatott áramköri lapokat (NYÁK) sajátkezűleg készítettük el. A NYÁK terv egy vetítőfóliára lett lézernyomtatóval kinyomtatva, amelyet ráhelyeztünk az epoxi alapú foto-érzékeny lakkal bevont lapra és UV fénynyel 20-25 percig megvilágítottunk. Az előhívás során híg nátrium-hidroxid oldatot használva, leoldottuk (kb. 5 perc alatt) a vékony filmréteg azon részeit, amelyeket nem fedett le a megvilágítás során a NYÁK terv fóliája. Fontos, hogy ne használjunk nagy töménységű oldatot, mert az pillanatok alatt leold mindent a panelről, inkább legyen kicsit hígabb az oldat és kézzel óvatosan simogatva gyorsítsuk fel a folyamatot. Ezzel az eljárással szabaddá tettük a réz réteg felesleges részeit, amelyeket sósavas vas-kloriddal lemarattunk (ez körülbelül 30-40 perces művelet), így kialakítottuk a vezető rajzolatot a lemezen. Végül izo-propil alkohollal a megmaradt filmrétegektől is megtisztítottuk (kb. 5 perc alatt) a NYÁK lapot.
- 2. Következő fázis: A CCC kamrák huzalozása. A kamra térformáló szálaihoz (Field Wire) 100 mikron vastagságú réz-berillium ötvözetből készült huzalt, az érzékeny szálakhoz (Sense Wire) 21 mikron vastagságú aranyozott wolfram huzalt használtunk. A kamra huzalozása egy előre megépített huzalfeszítő eszköz segítségével történt. Egy függőleges állványra rögzítettünk vízszintes irányban egy rudat, erre a rúdra ráhúztunk egy mm osztású vas keretet. Ennek a keretnek az egyik széléhez forrasztottuk huzalt, majd a huzalt átvezetve egy csigán, rá súlyokat akasztottunk, hogy az kellő feszességű legyen (Fileld Wire-ek kb. 1,75 N súllyal, a Sense Wireek kb. 0,30 N súllyal voltak megterhelve). Az egyikünk a vízszintes irányú rúdon forgatta a keretet ügyelve, hogy a huzal a megfelelő osztásba kerüljön (Sense Wire-ek a Field Wire-ektől 2 mm, Sense Wire-ek a Sense Wire-ektől ill. a Field Wireek a Field Wire-ektől 4 mm távolságra), közben a másikunk a huzalt propanollal tisztította és a hosszát változtatva, arra ügyelt hogy a huzal ne legyen túl feszes ill. ne legyen túl laza. Amikor elértük a szükséges szálmennyiséget (32 Sense Wire és 33 Field Wire), a legszélső szálat kb. 0,3 mm-rel kintebb rögzítettük le, ugyanis ezzel szeretnénk kompenzálni a kamra szélén várt elektromos teret. Végül a keretet lehúztuk a rúdról és ráhelyeztük a NYAK-ra, amelyre már előre ráragasztottuk a műanyag, mm osztásúra gravírozott szálvezetőt ill. a távtartót. Ebbe a szálvezetőbe illesztettük bele egyesével a szálakat, ügyelve hogy minden szál a megfelelő osztású helyre kerüljön. Végül kétkomponensű ragasztót használva rögzítettük őket, figyelve arra, hogy ne kenjük össze ragasztóval a padeket. Ezután hagytuk száradni egy éjszakát, ügyelve arra, hogy a lehető legkevesebb por és szösz kerüljön a szálakra és a vezető rétegekre.

3. A végső fázis: A NYÁK-ra ragasztott szálakat méretre vágtuk. A térformáló szálakat a közös kivezetésükre, az érzékeny szálakat az egyes szálakhoz tartozó kivezetésre forrasztottuk. A kamra falát alkotó plexi léceket is a szükséges méretre vágtuk, továbbá lyukat fúrtunk rájuk, hogy azon keresztül biztosítsuk a gáz be- ill. kiáramlását a kamrába. A kamra alapját képező NYÁK lemez sűrített levegővel történő portalanítása után ráragasztottuk a méretre vágott plexi léceket. Végül a ráragasztottuk a kamra katódjául szolgáló NYÁK lemezt a kamra falát képező plexi lécekre.



8. ábra. A CCC kamra vázlatos rajza felülnézetben.

2.2. A kamra gázrendszerének működése

A detektorunk működésének elengedhetetlen feltétele a megfelelő töltőgáz biztosítása. Ar és CO_2 gázok 9:1 arányú keverékét használjuk. Az Ar külső elektronhéja teljesen betöltött, ezért a kémiai reakciókban nem vesz részt. Az Ar csak egy-atomos molekulákat alkothat, így nem rendelkezik rezgési és forgási módusokkal. Ezért az Ar gázban, ionizáció során keletkezett, majd driftelő elektronok csak rugalmasan ütközhetnek. Ez kisebb energiaveszteséget jelent, tehát már alacsonyabb feszültségen elindul a sokszorozás. A sokszorozás során az Ar atomok gerjesztődnek és az így kialakuló energiatöbbletet 11,6 eV energiájú UV fotonok kibocsátásával adják le. Ezek az UV foton beütköznek a Cu katódba, amely ionizációs küszöbe 7,7 eV, így felületéről elektronok lépnek ki. Ennek következtében a sokszorozás önfeltartóvá válna, így detektorunk működésképtelen lenne [13]. A folyamat megelőzésére CO_2 gázt alkalmazunk, amely elnyeli az UV fotonokat.

A 9. ábrán látható a CCC kamrák gázrendszerének felépítése, melynek részei a következők:

- Ar és CO_2 gázokat tartalmazó palackok
- "Mass Flow Meter" segítségével ellenőrizhetjük, hogy a rendszeren áthaladó gáz elérie a detektor működéséhez szükséges mennyiséget. A rendszeren óránként 7 liter gázt áramoltatunk át.
- A gázkeverő rendszer segítségével állíthatjuk be a méréshez szükséges gázok megfelelő keverékét. Az általunk használt gáz 90 %-ban Ar-t és 10 %-ban CO₂-t tartalmaz.
- A kamrákon átáramló gáz végül a buborékoltatón áramlik át és távozik a rendszerből. A buborékoltató segítségével figyelemmel követhetjük a rendszer megfelelő működését, ugyanis ha nem látunk buborékot, a gáz nem áramlik át a rendszeren (pl. szivárog valahol). A buborékoltató továbbá néhány tized mbar túlnyomást ad a kamráknak, hogy kifelé áramoljon a gáz a mikroszkopikus repedéseken, csökkentve a levegő bediffundálását.



9. ábra. A CCC kamra gázrendszerének felépítése.

2.3. A CCC kamra elektronikája

Nagy- ill. kisfeszültségű tápegységek biztosítják a kamra és a kiolvasóelektronikák megfelelő működéséhez szükséges feszültségeket. A gáztöltésű detektorok legfontosabb tulajdonsága a gázerősítés, amely a kamra szálai és a katód közötti feszültségétől függ [14]. Nagyfeszültség generátor adja a kamra érzékeny szálaira a +950 és +1000 V, a térformáló szálakra és katódra -500 és -600 V közötti egyenfeszültségeket. Katódok közötti közel homogén elektromos tér az érzékenyszálak felé tereli az elektronokat (kb. 100 elektront). A 21 mikron átmerőjű érzékenyszálak közelében megnövekszik az elektromos térerősség, annyira, hogy az már elegendő az elektronlavina kialakulásához. Így már mérhető elektromos jel jelenik meg a szálakon és a szegmentált katód elektródáin (padeken). A padek és a szálak között kapacitív csatolás van, ezért ellenkező előjelű töltés (tükörtöltés) alakul ki a padeken a szálakhoz képest.

A kamrák jeleit kiolvasó elektronikákat sajátkezűleg készítettük el. Ezekben három fajta integrált áramkört (Integrated Circuit, IC) alkalmazunk: 4 darab CD4001 típusú IC-t [15], amelyek egyenként 4 darab CMOS³ NOR kaput tartalmaznak; 3 darab CD4069 típusú IC-t [16], melyek mindegyikében 6 CMOS inverter van ill. 2 darab 74HCT165 típusú IC-t, melyekben shift regiszterek vannak. A 4001-es és 4069-es IC-k végzik az analóg jelek erősítését (első két fokozat). Az elektronika harmadik fokozata (74HCT165 típusú IC) végzi el az analóg jel digitalizálását. Kisfeszültségű tápegység adja az elektronikák működéséhez szükséges feszültségeket: 4001-es és 4069-es IC-k működéséhez elegendő 4 V tápfeszültség biztosítása, a 74HCT165 IC-k működéséhez 5 V tápfeszültség szükséges.

A jelek kiolvasása egy összetett folyamat, ezt szemlélteti a 10. ábrán látható blokkvázlat. Ennek a legfontosabb részei a következők:

- Koincidencia Egység (COINCIDENCE UNIT) érzékeli azokat a jeleket, amelyek együttes "megszólalása" esetén egy trigger jelet ad tovább a Trigger Egységnek. Ezek lehetnek egy-egy a kamra felé és alá elhelyezett szintillátor jelei, de a kamra triggerelhet akár a saját érzékeny szálainak jeleire is.
- A Trigger Egység (TRIGGER UNIT) minden triggerre küld egy 300-400 ns széles négyszögjelet (CAMAC⁴ ADC GATE) a CAMAC ADC-nek. A négyszögjel megadja az analóg-digitál konverternek, hogy mikortól, meddig végezze az analóg jel (lásd 11. ábra) integrálását és digitalizálását. A trigger jel (DIGI TRIGGER) a digitális kiolvasó elektronikákhoz kb. 600 ns késleltetéssel érkezik, amikor a jel ott maximális. Az elektronikák minden kapott órajel után küldenek egy bitet a PC-nek, amely a blokkolja a triggert a bitek kiolvasása során. Miután véget ért a bitek átadása, a PC feloldja a trigger blokkolását és várja az újabb trigger jelet.

³IC építési technológia: Complementary Metal-Oxide Semiconductor, komplementer fém-oxid félvezető. ⁴Computer Automated Measurement and Control, azaz számítógéppel automatizált mérés és irányítás.

- Digitális Elektronikák (az ábrán D.E.) olvassák ki az érzékeny szálak és padek analóg jeleit, azokat erősítik és digitalizálják.
- Az analóg kiolvasó elektronika (az ábrán A.E.) körülbelül harmincszorosára erősíti a térformáló szálak közös kivezetésén megjelenő analóg jelet, és továbbítja a CAMAC ADC-hez.
- Egy 10 bites analóg-digitál átalakító (CAMAC ADC) végzi az analóg elektronikától érkező jelek digitalizálását.
- A CAMAC Controller továbbítja a számítógép utasításait az analóg-digitál átalakítóhoz.
- A PC és a CAMAC Controller közötti kommunikáció Ethernet kapcsolat segítségével valósul meg. Ennek adatátviteli sebessége 10 Mbit/s.
- Az adatfolyam átvitele a digitális kiolvasó elektronikákról a számítógépre és a kommunikáció a Trigger Egység valamint a számítógép között LPT (Line Print Terminal) port segítségével történik.



10. ábra. A CCC kamra és a kiolvasó rendszer blokkvázlata.



11. ábra. A térformáló szálak közös kivezetésének végén megjelenő jelalakok az oszcilloszkóp 1-es csatornáján láthatóak (*sárga görbék*). A 2-es csatornán látható a 300 – 400 ns széles kapujel (CAMAC GATE), amelyet Trigger Egység küld a CAMAC ADC-nek (*kék vonal*). A 3-as csatornán az impulzus-szerű trigger jel látható, amelyre a jel kiolvasása elkezdődik (*rózsaszín vonal*).

2.4. A kiolvasott adatok struktúrája

Tekintettel arra, hogy az elmúlt két évben bevált egy adott adatkiírási struktúra, ebben az alfejezetben tárgyalom ennek részleteit, ami ilyen módon hasznos összefoglalása ezeknek a technikai részleteknek.

A mérések során keletkező adatainkat a Hamar Gergő által írt "Measurments_Controller" nevű program segítségével tudjuk összegyűjteni. A mérőprogramban beállíthatjuk milyen paraméterekkel szeretnénk mérést végezni, ezek közül a legfontosabbak: hány eseményt szeretnénk felvenni, mekkora nagyfeszültségeket adtunk a kamrák térformáló- és érzékeny szálaira valamint a katódra, a kamrák milyen távol vannak egymástól (mm-ben medadva), milyen gázokat áramoltatunk a kamrákon keresztül ill. azokat milyen arányban kevertük egymással, végül milyen típusú elektronikákat használunk. A mérőprogram elkészíti a "file.sett" (setting) kiterjesztésű fájlt, amelybe beleírja a mérés előtt beállított paramétereket, ezzel párhuzamosan hisztogramokat is készít, egy "file.hists" (histograms) kiterjesztésű fájlba. Továbbá a felvett adatokat kiírja egy "file.ebe" (event by event) kiterjesztésű fájlba (lásd 12. ábra), amely felépítését jól tükrözi a neve. E fájl minden sora egy-egy esemény, amelyben szereplő számok jelentése 2 kamrás mérés esetében a következő:

- Az első szám az egyes események sorszámát jelöli.
- A második szám az előző esemény óta eltelt időt adja meg mikroszekundumban.
- A harmadik számtól kezdve az elektronikák csatornáinak megszólalását jelzi, ha egy szám értéke "1", akkor ott volt beütés; ha "0", akkor nem. A csatornákat úgy követik egymást, hogy az első 48 szám a felső kamra padjeihez tartozik, azt követő 32 szám a felső kamra érzékeny szálainak csatornáihoz, majd a következő 80 az alatta levő kamra padjeinek és érzékeny szálainak "megszólalását" mutatja.
- Az utolsó 2 szám az egyes kamrákban összegyűlt töltés mennyiségét mutatja ADC egységekben.
- Megj.: 3 kamrás mérés esetében minden sorban megjelenik további 80 szám (48 db pad és 32 db érzékeny szál) és még egy, a harmadik kamrában összegyűlt töltés mennyiség.

Az	esemér	iy soi	rszá	ma									Az	als	só l	kan	nra	Dad	diei										
,	Az el	őző e	esmé	ánv	óta	elte	lt id	lő m	nikro	ose		ndı	umb	ban	m	ea	adv	a	<		7	alsó	ka	ımr	a é	rzél	kem	vszá	lai
/		/			Δ fe	lső	kan	nra	nad	liei		Λ ÷.	مامھ	ko		- 5 -		 kon			2	2100					.0.1.j	,020	
1	*			,		100	NGAI I	ii ta	puo	yer		Alte	also	Ka		ae	ize	ken	ys.	2.60.0	11					$\langle \rangle$			
0	81341	7 0	000	000	00	0 0	00	00	0.0	0	0 0	0	0 0	0.0	lo l	0 0	0(0 (0 0	0 (0 0	00	00	20	00	00	00	00	1
00	0000	วี่ดัด	00	00	00	00	0.0	00	00	0 0	0 (0 0	10	00	00	0 (0 0	0 0	0 (0 0	0 0	0.0	0	00	11	. 1	10	000	20
00	0000	000	00	00	00	00	00	00	00	0 0	0 (0 0	00	00	0 0	00	0 (0 0	0 (0 (00	0.0	1	11	11	1	10	000	0 (
15	271 🗲	— A	z eg	iyes	kar	mrá	kon	me	gje	len	őċ	SS	ztöl	tés	AD	C	egy	séç	jek	bei	٦								
1	26232	36	000	Ő0(00	0 0	0 0	00	õ 0	0	0 0	0	0 0	0.0	1	0 0	0 (00	ÓΟ	0 (0 0	00	0 0	0 0	00	0.0	00	00	0
0.0	0000	000	00	00	0 0	10	0 0	0.0	00	0 0	0 (0 0	0 0	00	0 0	0 0	0 (0 0	0 (0 (0 0	0.0	0	0 0	0.0	0(00	000	0 (
00	1000	000	00	00	0 0	00	0.0	0.0	00	0 0	0.0	0 0	0.0	00	0 0	0 (0 (0 0	01	L 0	0 0	0.0	0	0 0	0.0	0(00	000	0 0
0 3	7 39																												
2	6589	18 0	00	0.0	0.0	00	00	0.0	0 0	0 0	0 (0 0	0 (0 0	0 0	0 (11	0 0	0 (0 0	0(00	0 C	0 () ()	00	00	00	0 C
00	0000	000	00	0 0	0 0	00	0.0	00	00	0 0	0 :	11	0.0	00	0 0	0 (0 (0 0	0 (0 (0 0	0.0	0	0 0	00	0(00:	110	0 (
00	0000	000	00	00	0 0	00	0.0	00	00	0 0	0 (0 0	0 0	00	0 C	0 (0 (00	0 (0 (0 0	0.0	0	10	0.0	0(00	000) ()
105	155																												
3	10728	19	000	00	00	0 0	0 0	00	0.0	0 (0.0	0	0 0	00	0	0 0	0 0	00	0 0	0:	L 0	00	0 0	0 0	00	0.0	00	00	0
00	0000	000	00	0 0	0 0	10	0.0	00	00	0 0	0 (0 0	0 0	00	0 0	0 (0 (0 0	0 0	0 (0 0	0.0	0	0 0	0.0	0(00(000) ()
00	0000	100	00	0 0	0 0	00	0.0	00	00	0 0	0 (0 0	0 0	00	0 C	0 (0 (0 0	0 (0 (01	0.0	0	0 0	0 0	0(00	000	0 (
0 4	5 67																												
4	7167	76 C	000	0.0	0.0	00	00	0.0	00	0 0	0 (0 0	00	0 0	0 0) (0 0	0 0	0 (0 0	0(00	0 0	0 0) ()	00	00	00	0 C
00	0000	001	00	00	00	00	00	00	00	0 0	0 (0 0	0 0	00	0 C	0 (0 (00	0 0	0 0	0 0	00	0	0 0	0.0	00	00:	100) ()
0.0	0000	000	00	0 0	0 0	00	0.0	00	00	0 0	0 (0 0	0.0	00	0 C	0 (0 (10	0 0	0 0	0 0	0.0	0	0 0	0.0	0(00	000) ()
21	85																												

12. ábra. A "mérés.ebe" kiterjesztésű fájl szerkezete, 2 kamrával történő mérés esetén.

2.5. A detektor szerkezeti felépítése

A detektort három darab CCC kamrából építettük fel, amely szerkezetét a 13. ábra mutatja. Ennek oka, hogy legalább három darab kamra kell, hogy egyértelműen és pontosan meg tudjuk mérni a müonok pályáját a detektorban. Két kamra esetében, ha az egyiken egy hamis beütés történik, az hibát okoz a szögmérés pontosságában (pl. akkor szólal meg egy pad és egy érzékelő szál, amikor nem haladt keresztül ott részecske). Ha legalább három kamrát használunk, akkor a 3 pontra történő egyenes illesztésével, csökkenteni tudjuk egy ilyen hiba előfordulásából származó pontatlanságot.

Minden beérkező mü
on térbeli pályájának megadásához két szög-koordináta szükséges. A zenit-szögnek
 (ϑ) nevezzük a beérkező részecske pályája és a függőleges egyenes által bezárt szöget, ez egy
 -90 és +90 fok közötti értéket vehet fel. Az azimut-szög
 (φ) adja meg, hogy a részecske milyen irányból érkezett a detektorba, ennek értéke
 0 és +360 fok közötti lehet. A kamrákat párhuzamosan
 5-5 cm távolságra helyeztük el egymástól függőleges irányban. Így biztosítva, hogy a felső kamrára körülbelül 120 fok látószögben érkező részecskék még biztosan keresztülhaladnak az alsó kamrán is.



13. ábra. A detektor összeállítás három CCC kamrával.

3. A kamrák analóg jeleinek vizsgálata

Jelen fejezetben mutatom be a méréseimet, amelyeket a 2. fejezetben leírt kamrákkal végeztem el az MTA KFKI RMKI Gázdetektor Laboratóriumában. Továbbá közlöm a mérési eredményeimet és az azokból levont következtetéseimet.

3.1. A CCC kamra gázerősítésének vizsgálata

Ismert, hogy a gáztöltésű detektorok gázerősítése exponenciálisan függ az anódszálra adott feszültségtől [17]. A kamrák megfelelő működésének ellenőrzése céljából megmértük, ez a törvény teljesül-e az általunk készített CCC kamrákra. Az érzékeny szálakra kapcsolt feszültséget 900 Volttól kezdve, 25 Voltonként növelve, minden egyes feszültség értéknél kiszámoltam a program segítségével az ADC-vel rögzített analóg jelek (jelfeszültség integráljának) eloszlását, amely a 14. ábrán látható. A bal ábrán látható töltéseloszláshoz 850 V feszültséget kapcsoltunk az érzékeny szálakra, ott még nem elég nagy az erősítés, tehát csak a zajt mérhetjük ki. 1000 V-nál már láthatóan elválik az ionizációra jellemző Landau-eloszlás a Gaussos zajtól, azon a feszültségen már mérhető jel jelenik meg a szálakon és a padeken (jobb ábra).





A hisztogramoknak kiszámoltam az átlagát és mediánját különböző érzékeny szál feszültségeknél a program segítségével. Az érzékeny szálakra kapcsolt feszültség függvényében ábrázoltam az egyes hisztogramokhoz tartozó átlagok és mediánok arányát (lásd 15. ábra). Látható, hogy ezek aránya állandó az alkalmazott 900-1000 V-os tartományban, ezért bármelyiket használhatom a feszültség és a gázerősítés közötti összefüggés meghatározására. A gázerősítés jellemzésére a hisztogramok mediánját válaszottam a hisztogramok átlagával szemben, mert a medián kevésbé érzékeny a kiugró adatokra.



15. ábra. A különböző érzékeny szál feszültségértékeknél megmért a töltéseloszlás hisztogramok átlaga és mediánja. Azok aránya látható a feszültség fügvényében.

Az érzékeny szálakra adott feszültségek függvényében logaritmikus skálán ábrázoltam az egyes hisztogramokhoz tartozó mediánokat (lásd 16. ábra). Az ábrán jól látható, hogy közöttük egyenes arányosság van, így lineáris skálán nézve a medián és az arányosság miatt a gázerősítés (G) is exponenciálisan függ az érzékelőszálakra adott feszültségétől (U):

$$G \sim \exp\left\{ (0,0069 \pm 0,0005) \cdot U + (-2,0212 \pm 0,4641) \right\}.$$
 (1)



16. ábra. A különböző érzékeny szál feszültség értékeknél mért gázerősítés.

3.2. Az optimális gázáramlás meghatározása

A kamrák működéséhez szükséges minimális gázmennyiség meghatározásának céljából méréseket végeztünk egy CCC kamrán ⁹⁰Sr β forrás segítségével. A mérés során a kamra ézékeny szálait 1080 V feszültségre kapcsoltunk. A mérés előtt feltöltöttük a rendszert gázzal. A gázrendszeren óránkénti 7 liternek megfelelő gázmennyiséget áramoltattunk át. Majd a gázt elzártuk és magára hagytuk a rendszert. Ekkor – miközben hagytuk, hogy a levegőben található oxigén bediffundáljon a kamrába – exponenciálisan csökkent a gáz-erősítés. Ennek időbeli lefutását a 17. ábrán szemléltetem.

Később kinyitottuk a gázt, ekkor a beáramló gáz nyomása újra megakadályozta, hogy bediffundáljon a kamrába az oxigén. A sokszorozás ismét elindult, az elektronok száma közel exponenciális mértékű növekedést mutatott (lásd 18. ábra). A kamra gázerősítése kb. negyed óra alatt érte el azt a nagyságrendet, hogy a kamra szálainak és padjeinek jeleit egyértelműen meg tudtuk különböztetni az elektronikák zajától. Miután a programom segítségével meghatároztam a gázerősítés időben történő változását, kiszámoltam ezeknek a folyamatoknak a relaxációs idejét is:

$$\tau_0 = \frac{1}{-m_0} \text{ és } \tau = \frac{1}{m} ,$$
(2)

ahol m₀ és m az illesztett egyenesek meredeksége (lásd 17. és 18 ábrák). A gázerősítés csökkenésének relaxációs ideje $\tau_0 = 238$ perc, a gázerősítés növekedésének relaxációs ideje pedig $\tau = 15$ perc. Ezeknek a relaxációs időknek az arányából megkapható mennyi az gázmenynyiség, amelyet keresztül áramoltatva a kamrán, még megtudjuk különböztetni a jelet a zajtól:

$$F = F_0 \frac{\tau}{\tau_0} \quad , \tag{3}$$

ahol $F_0 = 7$ liter/óra, a mérés kezdetén a CCC kamrákon beállított gázáramlás értéke. Ez a mennyiség 0,44 liter/órának adódott, tehát a rendszer megfelelő működéséhez elegendő az eddig használt gázmennyiség akár tized része is. A későbbi méréseinkben a gázáramlás értékének 1,5-2 liter/órát állítottunk be, amely a gázszelepen beállítható minimális áramlás.



17. ábra. A kamrán lévő átlagos össztöltés változása az idő függvényében elzárt gáz esetén. Az átlagos össztöltés logaritmikus skálán lineárisan csökken.



18. ábra. A kamrán lévő átlagos össztöltés változása az idő függvényében a gáz megnyitása után. Az átlagos össztöltés logaritmikus skálán lineárisan nő.

4. A detektor kamrák tesztelése

Jelen fejezetben bemutatom a CCC kamrákból felépített detektor tesztelését, amelyet a CERN Proton Synchrotron gyorsítójában és az MTA KFKI RMKI Gázdetektor Laboratóriumában végeztünk el. Ismertetem továbbá a tesztek eredményeit és azokból levont következtetéseimet.

Napjainkban a nagyenergiás részecskefizika és magfizika egyik legkiemelkedőbb kutatóközpontja a CERN⁵. Jelenleg mintegy 10 egymásba kapcsolódó gyorsító található a CERN-ben, amelyek számos felfedezés helyéül szolgáltak az elmúlt évtizedekben.

A REGARD csoport 2010 augusztusában az LHC⁶ ALICE⁷ kísérlet nagyon nagy impulzusú részecskéket azonosító detektorának (Very High Momentum Particle Identification Detector, VHMPID) a trigger rendszerét (High P_T Trigger Detector, HPTD) tesztelte az új fejlesztésű CCC kamrák (köztük a 3 müontomográf kamra) segítségével a Proton Synchrotron (PS) gyorsítóban. A müontomográf kamrák felépítése hasonló a HPTD kamrákéhoz (HPTD kamrák egydimenzióban érzékenyek), viszont méretben még egy nagyságrenddel kisebb azoknál. A PS gyorsítót 1959 óta működtetik, eredetileg protonokat gyorsított fel 28 GeV energiára [18]. Ma a PS az SPS-en keresztül az LHC előgyorsítójaként működik. A CCC kamrák nem csak a kozmikus müonokra érzékenyek. Minden olyan részecskét detektálnak, amelyek ionizálják az Ar és CO₂ gázkeveréket. A laborban található ⁹⁰Sr forrásal ill. kozmikus müonokkal történő mérésekkel szemben a nagyenergiás pionnyaláb alkalmazásának számos előnye van: monoenergiás (5 GeV), nagy fluxusú, jól kollimált és segítségével jól pozicionálhatóak CCC kamráink.

A 19. ábrán látható a kísérleti berendezés, amelyet a PS gyorsító 5 GeV energiájú, berendezésünkre közel merőlegesen érkező pion nyalábban (lásd 19. és 20. ábra) helyeztünk el. A kísérleti berendezést 7 darab Közeli Katódú Kamrából építettük fel. Az összeállítás első, hatodik és hetedik kamrái a müontomográf kamrák voltak, ugyanis azok két dimenzióban érzékenyek, így azok segítségével pontosan megmérhetjük a pion nyaláb nyomát a detektoron keresztül.

⁵Conseil Européenne pour la Recherche Nucléaire, Európai Nukleáris Kutatási Szervezet.

⁶Large Hadron Collider, azaz a Nagy Hadronütköztető.

⁷A Large Ion Collider Experiment, azaz A Nagy Ionütköztető Kísérlet.



19. ábra. A CERN Proton Syncrotron gyorsító 5 GeV energiájú pionnyalábjában (*piros nyíl*) elhelyezett kísérleti összeállítás.



20. ábra. A detektorra közel merőlegesen érkező 5 GeV energiájú pion nyaláb.

4.1. Az események kiválogatása – cluster keresés

A kamrák digitális jeleinek kiértékelése előtt szükséges kiválogatni a "jó" eseményeket. "Jó" az esemény, ha a kamrán egy darab cluster található, továbbá ha a mérete maximum 4×4 darab 1-esből áll, tehát maximum négy szomszédos pad és maximum négy egymás melletti érzékeny szál "szólalt meg". Ezek kiválogatására írtam egy cluster kereső függvényt az analizáló C++ programomba, amely az egyes kamrák padjeinek és érzékeny szálainak jeleit vizsgálja.

Feltételezésem helyességét az alábbi cluster-gyakoriság vizsgálattal támasztom alá: Egy kétdimenziós tömb feltöltésének segítségével készítettem el a 21. ábrát, amelyen az egyes clusterméretek gyakorisága látható 1000 eseményre. A 21. ábrán jól látható, hogy 4×4esnél nagyobb clusterméretnél a gyakoriság nulla, továbbá a gyakoriság szimmetrikus pad és érzékeny szál "koordinátákra" nézve. Ezért érdemes ezt a méret-maximumot határnak választani a megfelelő clusterek kiválasztása során.



A clusterméretek eloszlása

21. ábra. Az clusterméretek gyakorisága a pad és érzékeny szál egységekben.

4.2. A detektor kamráinak pozicionálása

A müondetektorunk párhuzamosan elhelyezett kamrákból épül fel (lásd 2. fejezet). A részecskepályák pontos meghatározásához szükséges, hogy a detektor kamrái egzaktul egymás alatt helyezkedjenek el, ezért a kamrák igazítását minden mérés előtt el kell végezni. A kamrák pozicionálására több módszer is lehetséges. A CERN PS gyorsítójában a következő eljárást alakalmaztam a rendelkezésemre álló további 4 CCC kamra segítségével: Egyenest illesztettem a 7 kamrán, a clusterkereső algoritmus által megtalált beütésekre. Ezután kiszámoltam az egyes kamrákon mért pontok távolságát a rájuk illesztett egyenestől és ezeknek a távolságoknak megnéztem a gyakoriságát. Az így kapott hisztogramoknak kiszámoltam az átlagát, amely megadta az egyenestől való átlagos eltérést pad egységekben és kiszámoltam a hisztogramok szórását, amely megadta az átlagos eltérés bizonytalanságát, vagyis a helyfelbontást.

Az így kapott átlagos eltéréseket korrekcióként hozzáadtam a clusterkereső algoritmus eredményeként kapott hely koordinátákhoz. Majd ismét elvégezve az előbbiekben ismertetett eljárást, újra kiszámoltam az átlagos eltérést és annak bizonytalanságát. A 22. ábrán láthatóak az egyes kamrákhoz tartozó hisztogramok. A felső 3 hisztogramon látható az müontomográf kamrák átlagos eltérésének gyakorisága a korrekció nélkül. Az alsó három hisztogram mutatja a kamrák átlagos eltérésének gyakoriságát az első korrekció után.



A müontomográf kamrák eltéréseinek hisztogramjai

22. ábra. A müontomográf kamráinak pad egységben megadott eltéréseinek hisztogramjai. A felső 3 hisztogram mutatja a korrekció előtti átlagos eltérések gyakoriságát. Az alsó 3 hisztogramon pedig az korrekció után megadott átlagos eltérések gyakorisága látható.

A 23. ábrán látható az átlagos eltérések nagysága az első korrekció előtt (*piros négyzetek*), az első korrekció után (*sárga háromszögek*), majd a második korrekció után (*fekete pontok*). Az átlagos eltérések hibája a helyfelbontás, amely nagyságát 24. ábra mutatja korrekció nélkül (*piros négyzetek*) és az első korrekció után (*sárga háromszögek*). Látható, hogy a helyfelbontásban némi növekedés mutatkozik az 1. korrekció megtétele után. Ennek ellenére, eljárásom segítségével precízebben meghatározhatom a detektorunkon keresztülhaladó részecskék pályáját.

Megjegyzés: Érdekes kérdés, hogy a korrigálást hányszor érdemes elvégezni ahhoz, hogy optimális pontossággal megmérhessük egy a detektoron keresztülhaladó részecske pályáját. További korrekció megtétele után azt tapasztaltam, hogy az átlagos eltérés nem mutat további javulást a korrigálás többszöri ismétlésével. Ennek oka, hogy az átlagos eltérés csökkenésével szemben az átlagos eltérés bizonytalansága növekedést mutat. Az első korrekció után az átlagos eltérés nagysága gyakorlatilag elhanyagolható a bizonytalanságához képest, így már nem tudunk további érdemi korrekciót tenni.



23. ábra. A kamrákhoz tartozó, pad egységekben megadott átlagos eltérések nagysága az első korrekció előtt (*piros négyzetek*), az első korrekció után (*sárga háromszögek*) ill. a második korrekció után (*fekete pontok*).



24. ábra. A kamrákhoz tartozó, pad egységekben megadott helyfelbontások nagysága az első korrekció előtt (*piros négyszögek*) és az első korrekció után(*sárga háromszögek*).

4.3. A detektor kamráinak hatásfoka

Felmerül a kérdés, hogy a kamrákon mért beütések mennyiben származnak valódi részecske beütésből. A mérések során figyelmen kívül kell hagyni az elektromos zajból és azoktól a részecskéktől származó beütéseket, amelyek nem haladnak keresztül a detektor összes kamráján. A kamra hatásfoka megadja, hogy a kamrán valóban keresztülhaladó részecskék száma hány százaléka a kamrán történt összes beütésnek:

$$\eta = \frac{N_{\rm jó}}{N_{\rm összes}} \ , \tag{4}$$

ahol η a vizsgált kamra hatásfokát, N_{jo} a vizsgált kamrán mért "jó" beütések számát és $N_{\text{összes}}$ a vizsgált kamrán mért összes beütés számát jelöli.

A hatásfokot a következőképpen határoztam meg: A 3 müontomográf kamra mellett további 4 CCC kamrát felhasználva egyenest illesztettem 6 kamrára kihagyva az egyenes illesztésből az éppen vizsgált kamrát, a clusterkereső algoritmus által megtalált beütésekre. Extrapoláltam az egyenest a vizsgált kamrára és az összes beütések számát eggyel növeltem. Ezek után kiszámoltam, hogy a vizsgált kamrán történt beütés milyen távol esett az extrapolált ponttól: ha a két pont közötti távolság két pad egység (8 mm) vagy annál kisebb volt, akkor a jó beütések számát megnöveltem eggyel. Azért választottam 2 pad egységet a mért illetve az extrapolált pontot távolságának határának, mert a clusterezésnél maximum 4×4 -es méretű clustereket választunk ki és a beütés helyét éppen a cluster közepe adja meg, így egy 4×4 -es méretű cluster közepének (a részecske beütésének mért helye) és szélének távolsága éppen 2 pad egység. Végül miután ezt az eljárást alkalmaztam az összes eseményre, a vizsgált kamra hatásfokát egyszerűen a "jó" beütések és az összes beütések számának hányadosa alapján kaptam meg.

Ezzel az eljárással teljesen analóg módon (2 kamrán a clusterkereső algoritmus által megtalált beütésekre illesztett egyenesből extrapoláltam a 3. kamrára) elvégeztem a hatásfokok kiszámolását a müontomográf 3 kamrájára is. A 25. ábrán látható a detektor 7 kamrájának hatásfokai (*kék háromszögek*) és külön a müontomográf 3 kamrájának (1-es, 6-os és 7-es számú kamrák) hatásfokai (*fekete pontok*). A müontomográf kamráinak hatásfokai közötti különbségek az egyenes illesztések pontossága közötti különbségből adódik. Jól látszik, hogy az 1-es és a 7-es kamrák hatásfokai 7 ill. 5 %-kal kisebbek a többi kamra hatásfokaihoz képest. Ez nem valós fizikai effektus, a két kamra érzékeny szálaira kisebb feszültséget kapcsoltunk a mérések során, így több zajos volt esemény volt, amelyeket a clusterkereső-algoritmusom eldobott a mérés kiértékelése során.



25. ábra. A 7 kamrás elrendezés ($k \acute{e}k h \acute{a} romsz \ddot{o}gek$) és a 3 kamrás müontomográf (fekete pontok) hatásfoka.

4.4. A detektor szögfelbontása

A detektor tesztelése céljából az MTA KFKI Gázdetektor Laboratóriumában további vizsgálatokat végeztünk. Kozmikus méréseket végeztünk hét darab egymástól párhuzamosan, 4-4 cm-re elhelyezett Közeli Katódú Kamra segítségével. Meghatároztuk a detektor szögfelbontását, ha az egyenlő távolságra elhelyezett CCC kamrák egymástól való távolságát "változtattuk", ill. ha a középső kamra helyzetét "változtattuk" a két szélső kamrához képest. A detektoron történő beütések eloszlásának vizsgálatát ⁹⁰Sr β bomló forrással végeztük el (lásd A. Függelék).

A KAMRÁK SZÖGFELBONTÁSÁNAK VIZSGÁLATA

A kamrák szögfelbontása megmutatja mekkora az egymástól még éppen megkülönböztethető térbeli források zenitszögei közötti különbség. A szögfelbontás kiszámolható a detektorban lévő legfelső és legalsó kamrák helyfelbontásainak segítségével. Az átláthatóság érdekében tekintsük a 26. ábrát. A zenitszöget kiszámolhatjuk a következő összefüggésből (piros nyil):

$$\tan(\theta) = \frac{X_f - X_a}{d} \quad , \tag{5}$$

ahol X_f és X_a a clusterkereső algoritmus által megtalált beütések koordinátái a detektor legfelső (X_f) ill. legalsó kamráin (X_a) , d pedig a legfelső ill. legalsó kamra távolságát jelenti.



26. ábra. A detektoron θ zenitszögben keresztülhaladó kozmikus müon pályája (*piros nyíl*) ill. a koordináták ΔX_f és ΔX_a bizonytalanságából adódó $\theta - \Delta \theta$ minimális (*zöld nyíl*) és $\theta + \Delta \theta$ maximális (*kék nyíl*) zenitszögekhez tartozó részecske pályák.

A beütések koordinátáinak bizonytalansága ΔX_f és ΔX_a , amelyeket szintén figyelembe kell venni. A kamrák helyfelbontását is figyelembevéve az (5) egyenlet a következőképpen módosul:

$$\tan(\theta_{max}) = \frac{X_f - X_a + (\Delta X_f + \Delta X_a)}{d} = \tan(\theta + \Delta \theta)$$
 és (6)

$$\tan(\theta_{min}) = \frac{X_f - X_a - (\Delta X_f + \Delta X_a)}{d} = \tan(\theta - \Delta \theta) \quad , \tag{7}$$

ahol θ_{min} és θ_{max} a helyfelbontás figyelembe vételével kapott minimális (*zöld nyíl*) ill. maximális (*kék nyíl*) zenitszöget jelenti. Helyettesítsük be az (5) egyenletet a (6) ill. (7) egyenletekbe, ekkor a következő összefüggéseket kapjuk :

$$\tan(\theta) - \frac{(\Delta X_f + \Delta X_a)}{d} = \tan(\theta - \Delta \theta)$$
 és (8)

$$\tan(\theta) + \frac{(\Delta X_f + \Delta X_a)}{d} = \tan(\theta + \Delta \theta) \quad . \tag{9}$$

Alkalmazva a következő trigonometriai azonosságot a (8) és (9) egyenletek jobb oldalára:

$$\tan(\theta \pm \Delta \theta) = \frac{\tan(\theta) \pm \tan(\Delta \theta)}{1 \mp \tan(\theta) \tan(\Delta \theta)} , \qquad (10)$$

és az így kapott egyenleteket átrendezve, a $\Delta \theta$ szögfelbontásra következő kifejezést kaptam:

$$\tan(\Delta\theta) = \pm \frac{\Delta X_f + \Delta X_a}{d\left[1 + \frac{\Delta X_f + \Delta X_a}{d} \tan(\theta) + \tan(\theta) \tan(\theta)\right]} , \qquad (11)$$

ahol ΔX_f és ΔX_a a detektorunk felső és alsó kamráinak helyfelbontásai ill. θ a detektorunkon keresztülhaladó kozmikus müon zenitszöge. Továbbiakban ennek a kifejezésnek az eredményét tekintem az elméleti megfontolásokból kapott szögfelbontásnak.

A mért szögfelbontást a következő eljárással határoztam meg: Egyenest illesztettem 7 kamrán, a clusterkereső algoritmus által megtalált beütésekre, amely annyira pontosan illeszkedik a pontokra, hogy ezt tekintettem a detektoron keresztülhaladó részecske tényleges pályájának. Ezek után egyenest illesztettem a 3 müontomográf kamrára is, amelyet a detektoron keresztülhaladó részecske mért pályájának tekintettem. Az egyenesek meredeksége a detektoron áthatoló részecske tényleges ill. mért zenitszögét adja meg. Programom segítségével kiszámoltam a zenitszögek közötti különbséget, majd megnéztem azok gyakoriságát, amely normális eloszlást követ (lásd 27. ábra). Az illesztett gauss görbe paraméterei 4 cm-es kamra távolságok esetén:

$$a = (0,073 \pm 0,008)^{\circ}$$
 és $b = (0,656 \pm 0,009)^{\circ}$, (12)

ahol a az illesztett gauss görbe átlagát, tehát az átlagos zenitszög eltérést ill. b a az illesztett gauss görbe szórását, vagyis a szögfelbontást jelenti.

Ezután programom segítségével meghatároztam a zenitszög különbség eloszlás hisztogramjának az átlagát, tehát az átlagos zenitszög eltérést és kiszámoltam a hisztogram szórását, amely megadta az átlagos zenitszögeltérés bizonytalanságát, azaz a szögfelbontást. 4 cm-es kamra távolságok esetén a mért átlagos zenitszög eltérés 0,029°, a mért szögfelbontás pedig 0,585°. 4 cm-es kamratávolságoknál az elméleti megfontolásokból kapott szögfelbontás (lásd (11) egyenlet) $\Delta X_f = \Delta X_a = 0,4$ pad egység "átlagos" helyfelbontásokkal (lásd 24. ábra) ill. $\theta \approx 0°$ közelítést használva $\Delta \theta = 0,652$ °-nak adódott. A mérésből (lásd 27. ábra) ill. az elméleti megfontolásokból (lásd (11) egyenlet) kapott szögfelbontás jó közelítéssel megegyezik, tehát az általam használt eljárás alkalmazható a szögfelbontás meghatározására.



27. ábra. A részecske valódi és mért pályájának zenitszögei közötti különbségek gyakorisága 4 cm-es kamra távolságok esetén. A zenitszögek közötti különbségek gyakorisága normális eloszlást követ.

A szögfelbontás vizsgálata kamrák távolságát változtatva

A következő mérés célja az volt, hogy meghatározzam milyen összefüggés van a detektor szögfelbontása és a detektor kamráinak távolsága között. A vizsgálathoz a hét kamrás elrendezést használtam. A kiértékelésnél a megfelelő kamrákat vettem figyelembe: 4 cm-es kamra távolságoknál az 1-es 2-es és 3-as számú kamrákat, 8 cm-es kamra távolságoknál a 3-as, 5-ös és 7-es számú kamrákat ill. a 12 cm-es kamratávolságoknál az 1-es, 4-es és 7-es számú kamrákat vettem figyelembe a kiértékelés során.

A szögfelbontást a fentebb ismertetett eljárás segítségével határoztam meg a mérési adatokból. A 28. ábrán látható, hogy a mért $\Delta \theta$ szögfelbontások minden *d* kamra távolság esetén közel megegyeznek a fentebb ismertetett elméleti megfontolás eredményével. A 28. ábrán látható elméleti görbe egyenlete:

$$\Delta \theta = \frac{2,293}{d} \quad , \tag{13}$$

ahol $\Delta \theta$ az elméleti megfontolásokból kapott szögfelbontás és d a detektor felső és alsó kamráinak távolsága. Tehát a detektor $\Delta \theta$ szögfelbontása fordítottan arányos a felső és alsó kamrák d távolságával.



28. ábra. A szögfelbontás változása a kamrák távolságának növelésével.

A szögfelbontás vizsgálata a középső kamra helyzetét változtatva

A következő mérés célja az volt, hogy meghatározzam hogyan változik a detektor szögfelbontása egy nem feltétlenül szimmetrikus kamraelrendezésnél. A szögfelbontást az előző vizsgálatnál is használt eljárás segítségével határoztam meg a mérési adatokból. Kiértékelésnél a két szélső kamrát (1-es és 7-es számú kamrák) mindig figyelembe vettem, a középső müontomográf kamrának éppen azt a kamrát tekintettem, amelyik a megfelelő távolságra (a 2-es számú kamra 4 cm távolságot jelent, a 3-as számú kamra 8 cm távolságot jelent, stb.) helyezkedett el.

A 29. ábrán láthatóak a mért szögfelbontások és a rájuk illesztett cosinus görbe, amely egyenlete:

$$\Delta \theta = a \cos(bX) + c \quad , \tag{14}$$

ahol X a legfelső és középső kamrák távolsága ill. a, b és c az illesztett görbe paraméterei, amelyek értékei a következők:

$$a = -0.079 \pm 0.009, b = -0.261 \pm 0.007$$
 és $c = 0.599 \pm 0.006$. (15)

Látható, hogy ha elég közel helyezkedik el a középső kamra a felső vagy az alsó kamrahoz, akkor kisebb a $\Delta \theta$ szögfelbontás. Ennek magyarázata, hogy két, egymáshoz közel elhelyezkedő kamra pontosabban meghatározza a rajtuk keresztülhaladó kozmikus müon irányát, mint egy kamra. Ennek a precízebb "kamrának" és a további kamrának a segítségével már kisebb szögfelbontást kapunk, mintha önmagában a felső vagy az alsó kamrát alkalmazzuk a további kamrával.



29. ábra. A szögfelbontás változása a felső és középső kamra távolságának növelésével.

5. A kozmikus müonok vizsgálata a detektor segítségével

Jelen fejezetben bemutatom, hogy a REGARD csoport által épített detektor alkalmazható a kozmikus műönök szögelőszlásának és fluxusának vizsgálatára. Célom elsősorban olyan fizikai mennyiségek meghatározása, amelyekre elvi megfontolásokból is következtethetünk, ill. amelyekről a szakirodalom már közölt eredményeket. Azokat összehasonlítva az általunk mérttel, az olvasó is megbizonyosodhat detektorunk alkalmazhatóságáról. A mért adatok elemzését az általam írt program segítségével valósítottam meg.

5.1. A müon-események között eltelt idők eloszlása

A müonesemények véletlenek, azaz a müonok beérkezése bármely pillanatban azonos valószínűséggel történhet meg, továbbá minden beütést tekinthetünk egy-egy független eseménynek. Mivel detektorunk mérete gyakorlatilag elhanyagolható a nagy kiterjedésű müonzáporok méretéhez képest, ezért kicsi az esélye, hogy egy-egy záporból egyszerre több müon is keresztülhaladjon a detektorunkon, így egy müoneseményt függetlennek tekinthetünk a többitől. Az események között eltelt idők eloszlására exponenciális eloszlást vártam. Elsőként ezt vizsgáltam meg detektorunk segítségével.

A programom segítségével elsőként az egyes események között eltelt idők eloszlását vizsgáltam meg (lásd 30. ábra). Azért, hogy az eloszlást jobban szemléltessem az egyes "beütések" közötti időkülönbségek számát és azok hibáit logaritmikus skálán is ábrázoltam (lásd 31. ábra). Majd egy egyenest illesztettem ezekre a pontokra, ennek meredeksége:

$$m = -0,1194 \pm 0,0004 \text{ ms}^{-1}$$
 (16)

Jól látható, hogy az időkülönbségek száma lineárisan csökken a logaritmikus skálán, vagyis lineáris skálát tekintve az egyes események közötti időkülönbségek eloszlása ténylegesen exponenciális eloszlás:

$$N \sim \exp\left\{(-0, 1194 \pm 0, 0004) \cdot \Delta\tau\right\} \quad , \tag{17}$$

ahol N az idő különbségek számát, $\Delta \tau$ pedig az időkülönbségek nagyságát jelenti. A nagyobb időkülönbségekhez tartozó eseményszám hibája nagyobb és a Poisson statisztikát követve, a darabszám négyzetgyökével arányos. Tehát a nagy időkülönbségekhez kevés számú esemény tartozik, így azok számát csak nagyobb bizonytalansággal határozhatjuk meg.



30. ábra. A müon-események között eltelt idők exponenciális eloszlása. Az eloszlás jobb szemléltetéséért 1 ms széles "bineket" választottam.



31. ábra. A müon-események között eltelt idők eloszlását logaritmikus skálán ábrázolva látható, hogy az eloszlás lineárisan csökken, tehát exponenciális eloszlást követnek az események közötti időkülönbségek.

5.2. Beérkező müonok számának napszakfüggése

Megvizsgálhatjuk, hogy Földünk felszínére érkező műonok számára van-e valamilyen hatással a napszakok váltakozása. Ha pl. a Nap is jelentősen hozzájárul a műonfluxushoz, akkor különbségnek kell mutatkozni a nappal és éjszaka beérkező műonok száma között. Ez befolyásolhatja a méréshez szükséges időt és a mérések időzítését⁸.

Detektorunk 445254 müon-eseményt gyűjtött össze 92 óra alatt. Programom segítségével meghatároztam óránkénti müon-események számát. A müon-események időbeli eloszlását, órákra felbontva a 32. ábra mutatja. Jól látható, hogy az óránként beérkező müonok száma nem mutat néhány %-nál nagyobb eltérést. Ez megegyezik a korábban közölt szimulációk [19] és mérések [20, 21] eredményeivel, amelyek szintén alátámasztják, hogy csak 1-3 % a müonfluxusban megfigyelt különbség a nappali és éjszakai adatok között. Ezek az eredmények egyértelműen azt mutatják, hogy a müonfluxus elhanyagolhatóan függ a napszakok változásától, azaz későbbi méréseink során időben állandónak tekinthetjük.



32. ábra. A müon-események számának időbeli eloszlása. Jól látható, hogy az óránként beérkező müonok száma nem mutat néhány %-nál nagyobb eltérést. Tehát a napszakok váltakozása elhanyagolható a müon-események szempontjából.

⁸Idő hiányában a szezonális változásokról jelenleg még nincs adatunk.

5.3. A kozmikus müonok szögeloszlása

Az előbbi fejezetekben bemutattam, hogyan épülnek fel és miként működnek a CCC kamrák és a detektorunk. Első alkalmazásként a kozmikus müonok szögeloszlásának meghatározása volt a cél. A korábbi irodalmi adatok [22] és újabbak [23, 24, 25] alapján a kozmikus müonok zenitszögének eloszlására a következőt vártam:

$$\phi(\vartheta) = \phi_0 \cos^n(\vartheta) \quad , \tag{18}$$

ahol $\phi(\vartheta)$ a müonhozam értéke adott ϑ zenitszögnél ($|\vartheta| < 75^{\circ}$), ϕ_0 a müonhozam $\vartheta = 0^{\circ}$ zenitszögnél és n a zenitszögeloszlás kitevője, értéke ≈ 2 .

A detektorunkon keresztülhaladó kozmikus müonok zenit- és azimutszögét egyenes illesztések segítségével határoztam meg. Programom segítségével egyenest illesztek a 3-3 pad- és érzékeny szál koordinátákra. (A legkisebb négyzetek módszerével kiszámoltam az egyenesek meredekségét és tengelymetszetét, amelyeket beírtam az egyenes illesztő függvényembe.) Ezek az egyenesek a beérkező müon pályájának vetületeit adják meg, amelyekből kiszámolhatóak a zenit- és azimutszögek.

A kozmikus müonok zenitszögének pad irányú eloszlását a 33. ábrán rajzoltam fel 100000 müoneseményre. A mérés eredményeként kapott eloszlás a zenitszög cosinusától függ. A zenitszögeloszlás kitevő értéke:

$$n = 1,91 \pm 0,05 \quad , \tag{19}$$

amely megegyezik a korábbi mérések eredményével [22, 25].



33. ábra. A münok pad irányú zenitszögének eloszlása.

Érdekességképpen elkészítettem a detektorunkon keresztülhaladó müonok két dimenziós zenitszögeloszlását (lásd 34. ábra). A detektor alsó kamráján mért pad ill. érzékeny szál koordinátákból kivontam a felső kamrán mért pad ill. érzékeny szál koordinátákat. Ezután meghatároztam a különbségek eloszlását a programom segítségével. A mérés helyéül szolgáló Gázdetektor Laboratórium az épület legfelső emeletén található. Így a 34. ábra gyakorlatilag a korrekciómentes földfelszíni müoneloszlást mutatja.



34. ábra. A münok pad és érzékenyszál irányú zenit-szögének eloszlása pad egységekben megadva.

5.4. Ólomtorony müon leképezése

A következő méréseket azzal a céllal végeztem el, hogy megvizsgáljam a müontomográf érzékenységét valamint megmutassam detektorunk alkalmas nagysűrűségű kiterjedt tárgyak müon leképezésre. A müontomográf felett 12 cm-re építettem egy 8 cm \times 8 cm \times 17,5 cm méretű tornyot ólomtömbök felhasználásával. Ezt először a müontomográf éleivel párhuzamosan, majd 45°-ban elforgatva helyeztem el. A 35. ábra bal oldali ábráján látható a kísérleti berendezés és a felette elhelyezkedő ólomtorony.

Az első két mérés során 130000-130000 müon-eseményt gyűjtött össze detektorunk, először ólomtoronnyal, majd ólomtorony nélkül. A 35. ábra jobb oldali ábráján látható az ólomtorony müon leképezése, amelyet a következőképpen készítettem el: megnéztem a beütések eloszlását az ólomtorony aljához extrapolált 80 cm × 80 cm felületű síkon mindkét mérésre a programom segítségével. Ezután a kapott beütésszámokat lenormáltam a mérések idejével (ólomtoronnyal 13,039 óra, ólomtorony nélkül 12,246 óra), majd az ólomtornyos mérés intenzitását elosztottam az ólomtorony nélküli mérés intenzitásával. A 36. ábra bal és jobb oldali ábrája a pad ill. érzékenyszál irányokban látható relatív intenzitásokat mutatja "pixelenként"⁹. Összehasonlítva ezeket a 35. ábra bal oldali ábrájával, jól látszik, hogy kb. 10 %-ot csökken a relatív intezitás ott, ahol az ólomtoronyot elhelyeztem¹⁰.



35. ábra. Az ólomtömbökből építetett torony fényképe (bal oldali ábra) és a 4 cm \times 8 cm \times 35 cm méretű ólomtorony leképezése kozmikus müonokkal (jobb oldali ábra).

 $^{^92}$ pad \times 2 pad (8 mm \times 8 mm) nagyságű területet jelent egy pixel.

¹⁰A Bethe-Bloch formula alkalmazásával kiszámolható, hogy mekkora az a határ-energia, amelynél kisebb energiájú müonok nem juthatnak át adott vastagságú anyagrétegen (lásd B. Függelékben). Ez 17,5 cm vastagságú ólomréteg esetén 357 MeV energiát jelent.



36. ábra. Az ólomtorony pad (bal oldali ábra) és érzékeny szál (jobb oldali ábra) irányban mért relatív intenzitása. A relatív intenzitás kb. 10 %-ot csökken az ólomtorony helyén.

A 37. ábrán a detektor felett átlósan 45°-ban elhelyezett ólomtorony müon leképezése látható, amely $\pm 5^{\circ}$ zenit-szögben érkező kozmikus müonok beütésének eloszlását mutatja az ólomtorony közepére extraplolált síkban.



37. ábra. A detektor felett átlósan 45°-ban elhelyezett ólomtorony müon leképezése.

Ezek az eredmények egyértelműen azt bizonyítják, hogy detektrounk alkalmas különböző objektumok müon leképezésére laboratóriumi körülmények között.

6. Müon leképezés a Jánossy-féle aknában

Jelen fejezetben bemutatom a kozmikus müonhozam különböző mélységeken történő meghatározására irányuló méréseket, amelyeket az MTA KFKI területén található Jánossy-féle aknában végeztünk el.

Jánossy Lajos a XX. század egyik legkiemelkedőbb magyar fizikusa volt. Az elsők között ismerte fel a kozmikus zápor jelenségét 1938-ban [26]. Később rész vett a KFKI megalapításában és az ott elinduló kutatások irányításában [27]. 1951 nyarán az ő kérésére készült el a kiterjedt légizáporok tanulmányozására szolgáló, 32 méter mély akna. Az aknában felülről számíva 10 méterenként, sugarasan szétfutó, összesen 6 darab táró található. A Nemzetközi Geofizikai Évre (1957-1958) tervezték és 1958. február 20-án helyezték működésbe az aknában a kozmikus sugárzás μ mezon¹¹ komponensének vizsgálatára szolgáló "földalatti" obszervatóriumot, amely detektor egy Geiger-Müller csövekből felépülő teleszkóp volt. Az obszervatórium legkiemelkedőbb eredménye a Forbush-effektus¹² észlelése volt nagy energiatartományban (> 10 GeV) is. A berendezés egészen 1986-ig üzemelt az aknában.

24 év után újra mérések végzésére alkalmas hellyé alakítottuk ki a Jánossy-féle aknát. Célunk a kozmikus müonok számának mérése a különböző mélységeken detektorunk segítségével. A kozmikus müonhozam ismerete a különböző mélységeken lehetőséget biztosít számunkra, hogy könnyen becsléseket tehessünk más mélységeken és más anyagi környezetben (pl. barlangban) végzett földalatti mérések minimális idejére a detektorunk odahelyezése előtt. 2010. október 29-én helyeztük el detektorunkat a Jánossy aknában, ahol méréseket végeztünk 10 m (-1. szint) és 30 m (-3. szint) mélységeken. A 38. ábrán látható a kísérleti berendezés a Jánossy-féle akna -1. szintjén. Ennek legfontosabb részei, hasonlóan a 2. fejezetben leírtakhoz a következők:

 A detektor: A méréseket 4 darab CCC kamrából felépülő detektor segítségével végeztük el. A felső 3 kamra müontomográf kamráról kiolvastuk padeken ill. érzékeny szálakon keletkező jeleket is. A legalsó egy dimenziós CCC kamrát a triggerelés miatt építettük bele a detektorunkba, itt csak az érzékenyszálakon keletkező jeleket olvastuk ki.

¹¹Abban az időben még mezonnak gondolták a μ -t, de aztán kiderült, hogy az e⁻ testvére és lepton.

 $^{^{12}{\}rm A}$ kozmikus sugárzás intenzitásának a bolygóközi térben terjedő lökéshullámok által kiváltott hirtelen lecsökkenése.

- 2. A gázkeverékkel megtöltött gázpalack: Az aknában történő mérések során 80 %-ban Ar és 20 %-ban CO₂ gázokat alkalmaztunk.
- 3. A gázáramlást mérő eszköz a buborékoltatóval.
- 4. Trigger egység: Méréseinket a legfelső müontomográf kamra és a legalul elhelyezkedő egy dimenziós CCC kamra koincidenciájára végeztük el. A Jánossy-aknában történő mérések céljából készült el. Ennek működése megegyezik a 2. fejezetben leírt trigger egység működésével, azonban mérete és fogyasztása annál jelentősen kisebb.
- 5. 4 csatornás, nagyfeszültségű tápegység adja az érzékenyszálakra +1000 V, a katódra és a térformáló szálakra a -500 V feszültségeket.
- 6. Notebook: Ezen zajlik az adatok begyűjtése a "Measurments_Controller" nevű program segítségével.



38. ábra. Kísérleti berendezésünk a Jánossy-féle akna -1. szintjén.

6.1. Müonhozam mérés a Jánossy-féle aknában

Első méréseineket azzal a céllal végeztük el, hogy bizonyítsuk detektorunk megfelelően méri a müonhozamot. A müontomográffal a gázdetektor laboratóriumban ¹³ és a Jánossy-féle akna (lásd 39. ábra) -1. ill. -3. szintjén végeztünk méréseket. Méréseinkkel párhuzamosan egy 15 cm \times 45 cm érzékeny felületű szcintillációs detektort (2 db szcintillátor párhuzamosan, egymástól 5 cm távolságra) is beüzemeltünk, amely szcintillátorainak együttes megszólalásait (koincidenciáit) számoltuk egy koincidencia egység segítségével. A szcintillációs számlálóval 1 órás méréseket végeztünk az akna minden szintjén.



39. ábra. A Jánossy-féle akna Ny-K irányú metszete.

A mérések kiértékelése során a programom segítségével számoltam a müontomográfon keresztülhaladó kozmikus müon-nyomokat 8,2 órás időintervallumokban, majd kiszámoltam azok átlagát. A 8,2-es faktor a detektorok felületeinek és látószögeik közötti különbségéből adódik. A 40. ábrán láthatóak a szcintillációs számlálóval (*piros keresztek*) és a müontomográffal (*kék keresztek*) mért és korábbi számolások eredményeként kapott (*fekete keresztek*) müonhozamok [28].

Jól látszik, hogy kozmikus müonhozam közel ugyanannyi a 0. és -1. szinten a szcintillációs számlálóval ill. a müontomográffal történő mérések esetén. A -3. szinten mért müonhozamok között némi különbség mutatkozik (~ 25 %), mely oka feltehetőleg domborzati tényezőkre vezethető vissza.

¹³A gázdetektor laboratórium feletti fedém közel azonos az akna vészkijáratának szintje (0. szint) feletti fedémmel, ezért müonhozam szempontjából ekvivalens mélységeknek tekintettem.



40. ábra. Müonhozam mérés a szcintillációs számlálóval (*piros keresztek*), a müontomográffal (*kék keresztek*) és irodalmi adatok (*fekete keresztek*). A kozmikus müonok hozamának csökkenése a két mérési összeállítást használva közelítőleg megegyezik.

6.2. A kozmikus müonok szögeloszlása a Jánossy-féle aknában

Következő méréseink célja az volt, hogy meghatározzuk a zenitszög eloszlást az akna különböző szintjein, amelyekből információt kaphatunk az akna feletti földréteg inhomogenitásáról, ill. a domborzatról, tereptárgyakról. Méréseinket az akna -1. és -3 szintjein végeztük el, ezek időtartama egyenként néhány nap (1 - 6 nap) volt.

Detektorunkon keresztülhaladó kozmikus müonok zenitszögének meghatározását a következőképpen végeztem el: kiszámoltam a beütések pozícióját a detektor legfelső és legalsó kamráján, majd a legalsó kamrán mért koordinátából kivontam a legfelső kamrán mért koordinátát. Az így kapott zenitszög természetesen pad egységben van megadva, amely átszámolható szög egységekbe is: a legfelső ill. legalsó kamrák távolsága 8 cm a pad irányban ill. 12 cm érzékeny szál irányban, továbbá 1 pad egység az 4 mm távolságot jelent, az ezekből kapott zenitszögek fok egységekben:

$$\theta_{pad} = \arctan\left[\frac{4\,mm}{80\,mm}\right] = 2,86^{\circ} \text{ és } \theta_{sw} = \arctan\left[\frac{4\,mm}{120\,mm}\right] = 1,91^{\circ} ,$$

ahol θ_{pad} a pad irányú, θ_{sw} pedig az érzékenyszál irányú "zenitszög-egységet" jelenti.

Detektorunkkal 2 féle orientációjú méréseket végeztünk. Az akna táróival párhuzamosan, tehát 0°-ban a táróhoz képest (ekkor a padek Ny-K irányt, az érzékeny szálak pedig a D-É irányt "mutatták") és 45 °-kal elforgatva a táró irányához képest (ekkor a padek a DNy-ÉK, az érzékeny szálak pedig a DK-ÉNy irányt "mutatták"). A 41. ábrán láthatóak 0°-os detektor-orientációnál mért, a 42. ábrán pedig 45 °-os detektor-orientációnál mért zenitszög eloszlások és azok invertáltjai. Az invertálással egyszerűen kimutatható, ha az eloszlás asszmetrikus. A -3. szinten mért zenitszög eloszlásban (41. ábra jobb alsó ábrája) némi müonhozam többletet mutat a DNy-i irányban, amelyet az akna feletti domborzat (lásd 39. ábra) okozhat. Ennek egyértelmű bizonyításához további hosszabb idejű (3-4 hetes) mérések szükségesek.



41. ábra. A Jánossy-féle akna -1. szintjén mért zenitszög eloszlások a detektor $0^\circ\text{-}os$ pozíciójában.



Zenitszög eloszlások pad egységekben a detektor 45 fokos helyzetében

42. ábra. A Jánossy-féle akna -1. és -3. szintjén mért zenitszög eloszlások a detektor $45^\circ\text{-}os$ pozíciójában.

7. Összefoglalás

Dolgozatom elkészítése során lehetőséget kaptam bekapcsolódni a REGARD csoport munkájába. TDK kutatásom célja egy detektor és analizáló program létrehozása, amelyekkel kozmikus müonokat mérve, lehetőség nyílik pl. föld alatti üregek keresésére. Az általunk épített detektorral megmérhető a beérkező müonok száma és szögeloszlásuk. Így kellő idő alatt meghatározható a detektor feletti anyag sűrűség-eloszlása. A detektort három darab Közeli Katódú Kamrából (Close Cathode Chamber, CCC) építettük fel. Az egyes kamrák két dimenzióban érzékenyek, tehát segítségükkel megadhatjuk a rajtuk áthaladó müonok helyét. A három kamra együttes használatával pedig a detektorunkon keresztülhaladó müonok pályáját. Ebből meghatározható a kozmikus müonok szögeloszlása.

Elkészítettük a kamrák jeleit kiolvasó elektronikákat, amelyek segítségével egyszerre olvashatjuk ki a kamra analóg- és digitális jeleit. A detektor építésével párhuzamosan megírtam a kamrák jeleit analizáló C++ programot. A detektor tesztelését az MTA KFKI RMKI Gázdetektor Laboratóriumában és a CERN PS gyorsítójában végeztük el. Az analizáló programom segítségével végeztem el a tesztmérések során gyűjtött adatok kiértékelését. Továbbá megvizsgáltam a müon-események közötti idők eloszlását, az események számának napszaktól való függését és meghatároztam a kozmikus müonok szögeloszlását. A tesztmérések eredményei egyértelműen arra engednek következtetni, hogy detektorunk alkalmas lehet föld alatti mérések elvégzésére is.

2010 októberében elkezdtük a tesztméréseket a KFKI területén található Jánossy-féle aknában. A Jánossy-féle akna -1. és -3. szintjén végeztünk néhány napos (1-6 nap) méréseket. Ezekből az adatokból készített szögeloszlásokban látható némi asszimetria, amely az akna feletti földfelszín lejtéséből következhet, de egyértelműen még nem láthatóak az akna mérés feletti részei (3-4 hetes mérések szükségesek). A detektor további tesztelését a Budapesten található Molnár János-barlangban végezzük el, ezzel párhuzamosan megépítjük detektorunk egy újabb prototípusát. Sikeres tesztmérések esetén, távolabbi céljaink között szerepel detektorunkat alkalmazott kutatásokban is felhasználni, kezdve a barlangi üregek keresésétől, régészeti feltárásokon és építkezéseken történő alkalmazásán át, a geológiai kutatásokig.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok témavezetőimnek Barnaföldi Gergely Gábornak és Varga Dezsőnek a dolgozatom elkészítéséhez és a program megírásához szükséges kiváló elméleti ill. szakmai háttér biztosításáért és családomnak töretlen támogatásukért. Külön szeretném megköszönni Hamar Gergőnek az MTA KFKI RMKI Gázdetektor Laboratóriumban a mérések során nyújtott segítségét, valamint dolgozatom átolvasását és a hasznos megjegyzéseket.

Kutatásunkat az OTKA NKTH CK 77719, OTKA NKTH CK 77815 és az OTKA NK7816, OTKA PD-73596 pályázatok támogatták.

Hivatkozások

- University of Florida Department of Physics PHY4803L: Cosmic Ray Muons and the Muon Lifetime Advanced Physics Laboratory (2010)
- [2] Viktor Hess:
 Penetration Radiation in Seven Free Ballon Flights
 PZ, 13, (1912)
- [3] E. P. George: Commonw. Eng. (1955)
- [4] L. W. Alvarez, et al.: Search for Hidden Chambers in the Pyramids Science, 167, 832-839. (1970)
- R. Alfaro, V. Grabski et al: Searching for possible hidden chambers in the Pyramid of Sun Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference 5, 1265-1268. (2008)
- [6] Hiroyuki K. M. Tanaka et al.: High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan Earth and Planetary Science Letters 263, 104-113. (2007)
- [7] L.J. Schultz, K. N. Borozdin et al.: Cosmic Ray Muon Radiography for Contraband Detection
- [8] G. Macedonio and M. Martini: Motivations for muon radiography of active volcanoes Earth Planets Space, 61, 1-5. (2009)
- Barnaföldi G. G., Varga D.: GEM, avagy új trend a részecskedetektorok világában Fizikai Szemle 9. 292. (2008)

- [10] Hamar G., Kiss G., Varga D.: Asymmetric Multi Wire Proportional Chamber With Reduced Mechanical Tolerances [beküldve] NIM (2010)
- [11] G. Charpak:Evolution of the Automatic Spark ChambersAnnual Review of Nuclear Science, 20, 195-254. (1970)
- [12] F.Sauli:

Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers Lectures given in the Academic Training Programme of CERN 1975-1976 (1977)

[13] Kiss G.:

Sokszálas proporcionális kamrák fejlesztése részecskefizikai detektorokhoz Szakdolgozat, ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék (2010)

- [14] RMKI részecskefizika elektronikus jegyzete:9.1 Gázdetektorok
- [15] Texas Instruments: Data sheet acquired Harris Semiconductor SCHS015 (2003)
- Texas Instruments: Data sheet acquired Harris Semiconductor SCHS054C (2003)
- [17] H. Okuno et al.:
 Gas Gain Study for CO₂/Isobutane Mixtures
 KEK Preprint 99-74, TUAT-HEP 99-01, KINDAI-HEP 99-01, (1999)
- [18] Bencze Gy.:
 A CERN részecskegyorsítói Természet Világa, III. különszám (2000)
- [19] Thomas Hebbeker and Charles Timmermans: A Complication of High Energy Atmospheric Muon Data at Sea Level http://arxiv.org/pdf/hep-ph/0102042 (2001)
- [20] I. M. Brancus et al.: Correlations between solar events and the cosmic muon flux measured with WILLI detector PROCEEDINGS OF THE 31st ICRC, ŁODZ (2009)
- [21] Kobzi B., Sajtos L.: Kozmikus müonok kísérleti vizsgálata Tudományos Diákköri dolgozat ELTE TTK (2008)

[22]	Király P.: Kozmikus sugárzás vizsgálata 40 méter vízekvivalens mélységben Szakdolgozat ELTE TTK (1963)
[23]	S. Cecchini, E. Korolkova, A. Margiotta, L. Thompson: Atmospheric muon background in the ANTARES detector 29th International Cosmic Ray Conference Pune 00, 101–106. (2005)
[24]	G. Aggouras et al.: A measurement of the cosmic-ray muon flux with a module of the NESTOR neutrino telescope Astroparticle Physics 23, 377–392. (2005)
[25]	Jeng-Wei Lin et al.: Measurment of angular distribution of cosmic-ray muon fluence rate Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 619, 24-27. (2010)
[26]	Patkós A.: Részecskék az univerzumban Fizikai Szemle 5. 165. (2007)
[27]	Király P.: Jánossy Lajos, a fizikus Fizikai szemle 8. 274. (2005)
[28]	L.N.Bogdanova, M.G.Gavrilov, V.N.Kornoukhov, A.S.Starostin: Cosmic muon flux at shallow depths underground Institute for Theoretical and Experimental Physics
[29]	Donald E. Groom et al.: Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV-100 TeV Atomic Data and Nuclear Data Tables, 76, 2, (2001)
[30]	Edwin F. Taylor, John Archibald Wheeler: Téridőfizika 128-129.

[31] C. Amsler et al.:Extracted from the Review of Particle Physics Physics Letters B667, 220. (2008)

A. ⁹⁰Sr β forrás útjába helyezett testek árnyéka

A detektor egyik első tesztelésének céljából a megmértük a legfelső kamrán történő beütések eloszlását. Ebben az esetben egy a kamra felett 40 cm magasan elhelyezett ⁹⁰Sr forrást alkalmaztunk. Ebbben az esetben a kamrára triggereltük a mérést, így már az egész felületén meg tudtuk nézni a beütések eloszlását. A legfelső kamrára elhelyezett, 1,5 mm vastagságú plexilapra elsőként egy 20 mm × 49 mm × 54 mm nagyságú lyukas alumínium tömböt helyeztünk el. A 43. ábrán látható az alumínium ⁹⁰Sr forrással készített képe. A jobb oldali ábrán, a tömb árnyékának felső sarkában pedig kivehető a lyuk képe is.



43. ábra. Az alumínium tömb árnyéka a detektor legfelső kamráján oldal ill. felülnézetből.

Végezetül érdekességként – az 1. fejezet 5. ábrájának megfelelően – M6×20 csavarokkal kiraktuk az "ELTE" szót, amelyet a 44. ábra bal oldali képe mutat. A ⁹⁰Sr forrás és egy CCC kamra segítségével elkészítettük az "ELTE" felirat árnyékát, amelyet az 44. ábra jobb oldali képe mutat.



44. ábra. A csavarokkal kirakott "ELTE" betűk, és azok árnyéka a detektor legfelső kamráján.

B. Kozmikus müonok energiavesztesége anyagon való áthaladása során

A töltött részecskék gázokon vagy szilárd testeken történő áthaladásuk során az atomok elektronjaival Coulomb kölcsönhatásba lépnek és veszítenek az energiájukból. Ha a kölcsönhatás során átadott energia elegendő ahhoz, hogy az elektronokat kilökje az legkülső elektronhéjról, akkor ionizációról beszélünk. Ha nem elegendő, akkor az atom egyszerűen csak egy magasabb energiaszintre gerjesztődik. Az energiaveszteség nagysága kiszámolható a Bethe-Bloch formula segítségével [12, 29]:

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = -K \frac{Z}{A} \frac{\rho}{\beta^2} \left[\ln \frac{2 \, m_e \, c^2 \, \beta^2 \, E_M}{I^2 \, (1-\beta^2)} - 2 \, \beta^2 \right], \quad K = \frac{2\pi \, N \, z^2 \, e^4}{m_e \, c^2} \quad , \tag{20}$$

ahol E a $\beta = v/c$ sebességgel a "közegbe" érkező, Z rendszámú részecske mozgási energiája és I a közeget alkotó atomok ionizációs potenciálja, amely csak a közeget alkotó anyag rendszámától függ: $I = I_0 \cdot Z$, ahol $I_0 = 10$ eV. K = 0.154 MeV g⁻¹ cm² minden egységnyi töltésű részecskére. E_M egy kölcsönhatás során átadott maximális energiát jelenti, amely nagysága a relativisztikus kéttest-kinematikából adódik:

$$E_M = \frac{2 m_e c^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \quad . \tag{21}$$

A Bethe-Block formula főbb paraméterei:

- m_e az elektron tömege mutatja, hogy a kölcsönhatás során elegendő csak az elektronok hatását figyelembe venni
- $1/\beta^2$ mutatja, hogy minél kisebb a közegen áthaladó részcseke sebessége, annál több energiát ad le ott; tehát minél lassabban halad a részecske, annál több ideje van kölcsönhatni a közeget alkotó atomok elektronjaival
- $\beta/\sqrt{1-\beta^2} \approx 4$ értéknél minimális az energia veszteség, az előforduló részecske energiák is ennek az értéknek a közelében vannak, ezért ezekre a részecskékre bevezették a minimum ionizáló részecske (minimum ionizing particle, mip) elnevezést.
- β^2 -es tag a zárójelben azt jelzi, hogy a energia minimumtól felfelé az energiaveszteség újra növekszik, ezt relativisztikus növekedésnek (relativistic rise) nevezik.

• z^2 -es tag (z a közegbe érkező részecske töltése) segítségével töltésük szerint megkülönböztethetjük a közegbe érkező részecskéket

A müonok energiájukat sok, egyenként kevés energiát elvivő kölcsönhatásokban (pl.: ütközések, párkeltések, stb.) adják le. A müonok hatótávolsága arányos az energiájukkal. A Bethe-Bloch formula segítségével kiszámolható, hogy egy müon mennyi energiát ad le *d* vastagságú ólom-, vas-, alumínium- ill. mészkő-, föld-, víz- és levegőrétegben. Az elektron és müon kölcsönhatása során átadott maximális energia :

$$E_M = \frac{2 m_e c^2 \beta^2}{1 - \beta^2} = \frac{2 \cdot 0,511 \cdot 0,99975^2}{1 - 0,99975^2} = 2042,978 \,\mathrm{MeV} \ ,$$

ahol [30] alapján $\beta = 0.99975$ a müon "sebessége" és $E_0 = mc^2 = 0.511$ MeV az elektron nyugalmi energiája. A müon által leadott energia d vastagságú anyagrétegben:



45. ábra. A kozmikus müonok Bethe-Bloch görbéje különböző anyagokra [31].

A formulában szereplő anyagfüggő paramétereket és a különböző vastagságú anyagrétegekben, MeV egységekben leadott energiákat az alábbi táblázatban foglalom össze:

anyag	Ζ	А	$ ho~[{ m g/cm^3}]$	$E_{d=10cm}$	$E_{d=30cm}$	$E_{d=100cm}$	$E_{d=1000cm}$
levegő	14	29	0,0013	$0,\!03$	0,09	$0,\!30$	$_{3,0}$
H_2O	10	18	1	$28,\!97$	$86,\!91$	289,7	2897
talaj	30	60	2	48,46	$145,\!38$	$484,\! 6$	4846
$CaCO_3$	50	100	2,71	$62,\!8$	188,4	628	6280
Al	16	32	2,70	$63,\!15$	$189,\!45$	631,5	6315
Fe	26	56	$7,\!86$	$165,\!63$	$496,\!89$	$1656,\!3$	16563
Pb	82	207	$11,\!34$	$203,\!81$	$611,\!43$	2038,1	20381

1. táblázat. Energia veszteség MeV egységekben az anyagi minőség és mélység függvényében.