

# *Müon Tracking*

## *Időprojekciós kamrával*

Tudományos diákköri dolgozat

*Pázmándi Zsolt Péter*

Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
*Villamosmérnök BSc 1. évfolyam*

Témavezetők:

*Dr. Varga Dezső és Dr. Hamar Gergő*

Konzulens:

*Sarkadi Tamás*

*[MTA Wigner Fizikai kutatóközpont]*



# ***Tartalomjegyzék:***

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés.....                                                 | 3  |
| 1.1 Részecskedetektálás.....                                      | 4  |
| 1.2 Detektorrendszer működésének követelményei.....               | 5  |
| 1.3 Motiváció.....                                                | 5  |
| 2. A projekt célja.....                                           | 6  |
| 3. TPC detektor felhasználási területek.....                      | 6  |
| 4. Detektor működési elve.....                                    | 8  |
| 4.1 Multi Wire Proportional Chamber (MWPC).....                   | 8  |
| 4.2 Time Projection Chamber (TPC).....                            | 8  |
| 5. Detektorrendszer logikai vázlata.....                          | 10 |
| 6. Detektor fejlesztési fázisai.....                              | 11 |
| 7. Kiolvasó rendszer (DAQ).....                                   | 12 |
| 7.1 Felépítése.....                                               | 12 |
| 7.2 Programozás: FPGA logika és a számítógépen futó szoftver..... | 13 |
| 7.3 A kiolvasórendszer funkciói.....                              | 14 |
| 8. Kalibrálás.....                                                | 15 |
| 9. Analízis.....                                                  | 16 |
| 9.1 Nyers adatok értelmezése.....                                 | 16 |
| 9.2 Cél:.....                                                     | 16 |
| 9.3 Problémák:.....                                               | 16 |
| 9.4 Megvalósítás:.....                                            | 17 |
| 10. Mérési Eredmények, kiértékelés:.....                          | 18 |
| 10.1 Skálázás:.....                                               | 18 |
| 10.2: 2 dimenziós TPC detektor:.....                              | 19 |
| 10.3: 3 dimenziós TPC detektor:.....                              | 21 |
| 11. Összefoglalás.....                                            | 24 |
| 12. Hivatkozások.....                                             | 25 |

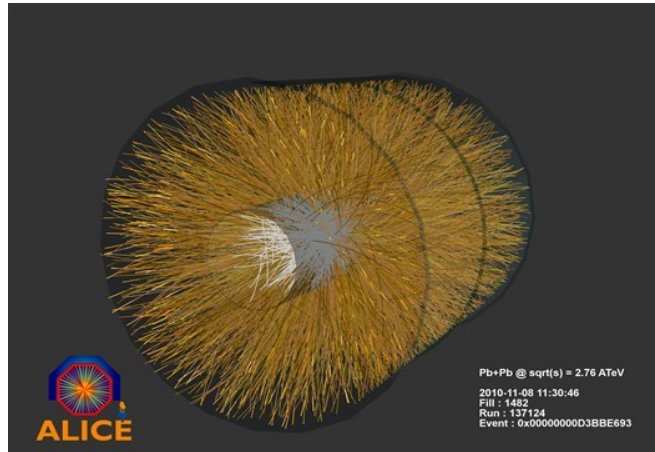


## 1.1 Részecskedetektálás

Egy részecske sok mérhető tulajdonsággal rendelkezik és ezen tulajdonságokat különböző módon, különböző detektorokkal tudjuk mérni. A detektorokat rendeltetésük szerint három csoportba érdemes sorolni:

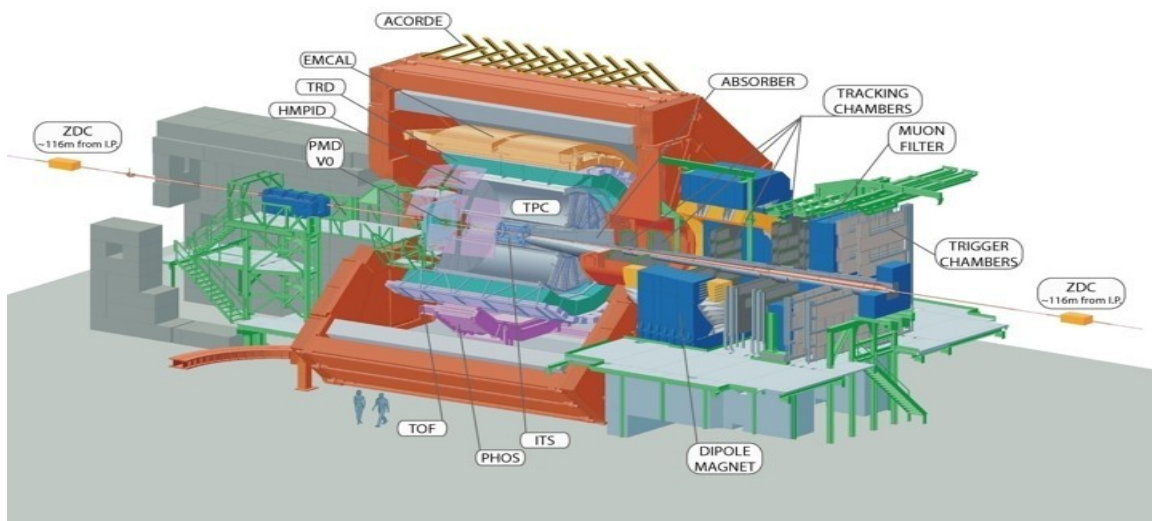
### Részecske azonosítás:

Az azonosítás egy összetettebb feladat, ugyanis a legtöbb részecske közel fénysebességgel halad. Ahhoz hogy meghatározzuk a részecske típusát, szükségünk van a tömegére. A tömeg meghatározható a részecske impulzusából és a pontosan mért sebességéből. Az impulzus nyomkövető detektorral mérhető a fentiek szerint. A sebesség mérése már nehezebb, a sok módszer egyike a [3] Cserenkov-sugárzást érzékelő detektor.

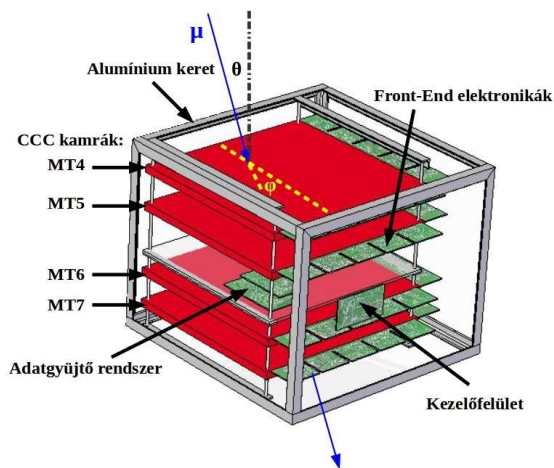


2. Ábra: ALICE kísérlet: részecske ütköztetésekor szétrepülő részecskék pályái az ALICE TPC detektoron belül

Részecske teljes leadott energiájának meghatározása: A teljes elnyelt energia mérésére a kaloriméter hivatott, ami jellemzően nagy anyagmennyiséget képvisel (akár több méter vas). Ezzel semleges részecskék válnak megfigyelhetővé (például foton, neutron) és segít bizonyos részecsketípusokat szétválogatni (a müonok például nem nyelődnek el még a kaloriméterekben sem).



3. Ábra: CERN: ALICE kísérlet [4], komplex detektorrendszer nagy energiás ütköztetések vizsgálatához.



4. Ábra: Nyomkövető müon tomográf felépítése. [5]

**Nyomkövető detektorok (tracking, azaz részecskepálya meghatározás):** A hőskorban köd, később buborékkamrával történt a részecskék megfigyelése. Az 1970-es évektől számos korszerű módszer alakult ki, mint például a gáztöltésű detektorok, a szcintillációs (fénykeltésen alapuló) detektorok, illetve a félvezető detektorok. A gáztöltésű detektorok csoportján belül két fontos eszköz a sokszálas proporcionális kamra, (MWPC, G. Charpak, Nobel díj 1992) illetve a TPC, amely jelen projekt témája is. A részecskék pályájának mérésével irányukat, valamint mágneses térben való eltérülésükkel megfelelően pontos nyomdetektorral az impulzusukat (lendületüket) mérhetjük.

## 1.2 Detektorrendszer működésének követelményei

Maguk a részecskefizikai detektorok jellemzően sok komponensből állnak, amelyek együttműködése szükséges a sikeres méréshez:

- A detektor működjön, jó hatásfokkal adjon jelet.
- Trigger: a mérést el kell indítani a megfelelő pillanatban, ennek a pillanatnak a megválasztása kulcsfontosságú, a detektorok jeleit kombinálva megkaphatjuk az értékes eseményeknek az időpillanatát.
- Jelerősítés, jelformálás: a gyenge elektronikus jelek mérhetővé válnak.
- DAQ (adat kiolvasó, digitalizáló, és feldolgozó rendszer): a jelek digitalizálása (analóg-digitál átalakítóval), majd az adatok kiolvasása, begyűjtése egy számítógépes rendszerbe.
- Utófeldolgozás: adat analízis, kiértékelés.

Minden egyes lépés kritikus – mind befolyásolja a mérés minőségét. Gyakorlati szempontból véve a detektor és a DAQ a legdrágább, és az analízissel egybevéve a legjelentősebb egyaránt.

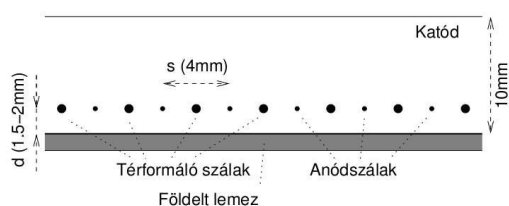
## 1.3 Motiváció

Munkámat és a tanulmányaimat a REGARD (MTA Wigner) kutatócsoportban kezdtem, ahol lehetőségem nyílt betekinteni a részecskefizika rejtelseibe. A REGARD csoport a Wigner Fizikai Kutatóközpont és az Eötvös Loránd Tudományegyetem együttműködéséből született, gáztöltésű detektorok kutatásával és fejlesztésével foglalkozó kutatócsoport, mely 2013-ban az Akadémia Lendület támogatását is elnyerte. A projektorientált munkákban a CERN-hez kapcsolódó részecskefizikai alapkutatásokhoz fejlesztünk detektorokat, valamint ezen technológiák környezet- és orvosi fizikai alkalmazásával is foglalkozunk.

Az egyik fejlesztési vonal amit végzünk a müon tracking, azaz kozmikus részecskék pályáinak meghatározása, melyhez a detektor választás során főként az alábbi három tulajdonság számottevő:

- o méret/költség arány
- o helyfelbontás: (pontosság, mm – cm nagyságrend)
- o időfelbontás: (pontosság,  $\mu$ s nagyságrend)

Jelenleg erre a célra több rétegben elhelyezett CCC (Close Cathode Chamber) detektorokat alkalmazunk, ellenben a technológia fejlődése (olcsóbb elektronika) lehetővé tette a TPC detektorok versenyképességét még árban is. A Time Projection Chamber, azaz az Idő



5. Ábra: CCC kamra felépítése. [6]

projekciós kamrák típusai egy gáztérfogatban tényleges három dimenziós képalkotást tesznek lehetővé. A TPC-t D. Nygren találta fel az 1980-as években, de akkor még nem volt elérhető a detektorhoz szükséges kiolvasórendszer. Legfőbb motivációm az, hogy készítsék egy olyan detektorrendszert melyben több lehetőség rejlik mint az elődjében.

## 2. A projekt célja

A projektem célja egy professzionális, egyben költséghatékony, nyomkövető TPC detektor építése, illetve az ehhez szükséges kiolvasórendszer, és minden egyéb elektronika megtervezése, legyártása, beüzemelése.

Mivel a részecske detektálása sok apró részlettől függ, ezért minden működési egységet külön tesztelni és optimalizálni kell a jó hatásfok érdekében.

Ennek lépései:

1. Kiolvasórendszer megtervezése, legyártása, beüzemelése (kritikus elem).
2. MWPC építése, tesztelése (részecskék detektálása, a kiolvasórendszer tesztelése).
3. 2 dimenziós TPC detektor építése, tesztelése (detektor építésének részletei, kiolvasórendszer fejlesztése, gázminőség és az elektronfelhő sodródásának vizsgálata).
4. 2 dimenziós MWPC építése, tesztelése.
5. 3 dimenziós TPC megépítése.
6. **Tracking: a detektor jeleinek feldolgozása, objektumok létrehozása az eseményről, mely további analízisre felhasználható.**

Jelenlegi dolgozat az eddigi eredmények összekapcsolását tűzte ki célul gyakorlati felhasználásra, müon tracking feladathoz.

## 3. TPC detektor felhasználási területek

A TPC detektor fő alkalmazási területe a részecskefizikai alapkutatásokban van, ellenben az alkalmazott fizika számos területén is megtalálható. Az alapkutatások terén pálya meghatározásra és impulzus mérésre használják a részecskék azonosításához, például a CERN NA61 és az ALICE kísérletben.

Alkalmazott fizikában főként a részecskepálya meghatározási képességét használják ki, melyből számíthatnak az anyag típusára, mennyiségére utaló szóródást vagy intenzitást. Konkrét példák az alkalmazott felhasználásokra:

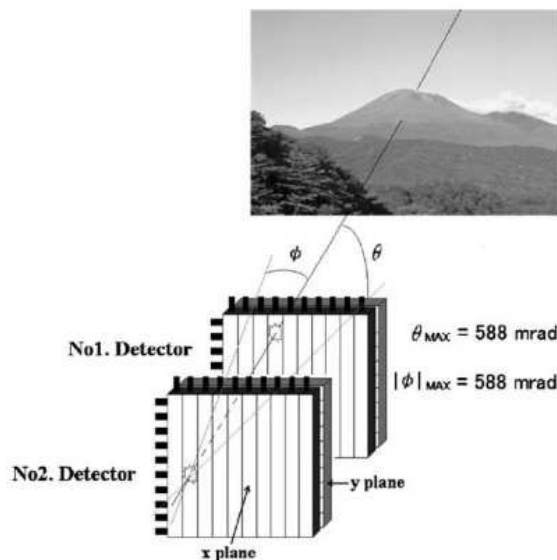
**Teherautó átvilágítás:** vannak esetek, mikor nem lehet sugárzással feltérképezni egy teherautó tartalmát, például ha organikus anyagokat tartalmaznak. Ezzel szemben a detektor a kozmoszból jövő, már meglévő sugárzásokat használja fel az elemzéshez (műonok). Ez a módszer az anyagokat csak kis mértékben képes megkülönböztetni egymástól, de akár egy ólommal tökéletesen lezárt radioaktív forrást is ki lehet vele mutatni. Ez az alkalmazás a részecskék szóródást használja fel az anyag meghatározására, a szóródást pedig megmérhetjük ha elhelyezünk egy műon tracker detektort a teherautó felé, egyet alá.

**Barlang kutatás:** [7] ezen a területen a detektort az üregek kimutatására lehet felhasználni, ezáltal a barlangászok információt nyerhetnek, hogy melyik irányban érdemes folytatni a feltárást. A detektort le kell vinni a barlang aljára és a fölülről érkező részecskék érkezési szögéből és intenzitásából meghatározható a barlangban lévő üregek pozíciója. Az alkalmazás az anyagban való elnyelődést használja fel a konkrét pozíció meghatározására. Ha valamely irányból több, nagyobb energiájú részecske érkezik az arra utal hogy ott nem nyelődött el annyi részecske, tehát üreg van.

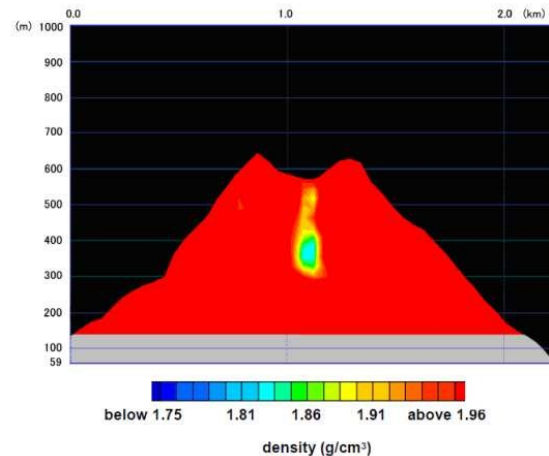
**Vulkán kutatás:** A vulkánkitörés előrejelzése mindig is nehéz feladat volt, ugyanis a vizsgálatok lehetőségei a környezeti körülmények miatt jelentősen korlátozott. A vulkán átvizsgálása hasonló módon történik mint a barlang kutatásnál. Mérjük a beérkező részecskék irányát, intenzitását és ha változást észlelünk abból következtetni tudunk kitörésre. A mérések azzal a különbséggel történnek hogy itt nincs lehetőség a detektort a vulkán aljára vinni, ezért a felszínen, a vulkán oldalánál helyezük el a detektort. Ez a fajta vizsgálat jelentősen komplikáltabb mint a barlangkutatásnál, pontosan meg kell mérni a detektor(ok) pozícióit, a hegyoldalra való rálátási szögét és becslést kell adni a vulkán belső szerkezetére is. További nehézség ebben az esetben az, hogy a müonok oldalirányban jelentősen kisebb intenzitással érkeznek, így kisebb a statisztika.



6. Ábra: A Müontomográf elhelyezése a 60 métermélyen található Ajándék-barlangban



7. Ábra: Detektorok elhelyezése vulkán kutatáshoz

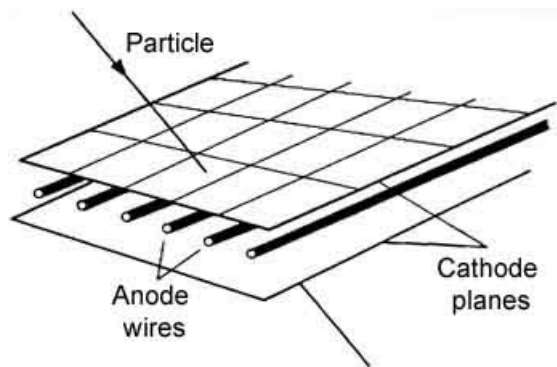


8. Ábra: Vulkán üregének kimutatása a mért sűrűség alapján [8]

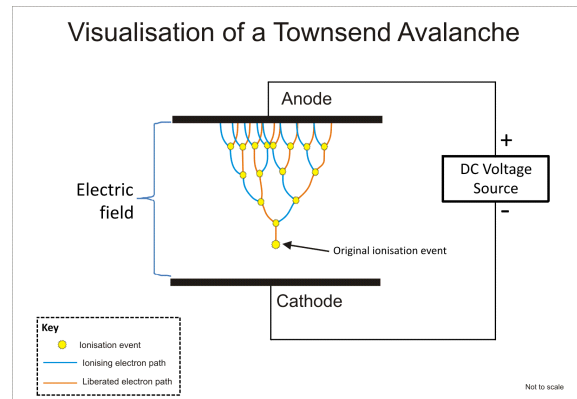
## 4. Detektor működési elve

### 4.1 Multi Wire Proportional Chamber (MWPC)

Mielőtt a TPC-re térnék, célszerűbb a sokszálú kamra működési elvét taglalni, ugyanis ez a detektor a TPC alapja. A sokszálú kamra egy olyan detektor, mely a részecskéket a gázban való ionizálás, illetve a lavina hatás útján méri. Egy részecske a kamrán való áthaladásakor  $\text{ArCO}_2$  gáz esetén körülbelül 100 elektront szabadít fel. Ez még nem elegendő a detektáláshoz, ugyanis az erősítő áramkörök egy-két nagyságrenddel nagyobb alapzajjal rendelkeznek. Az erősítés úgy történik, hogy pozitív feszültségre kötött vékony szálakat (anódszálakat) helyezünk el a kamrában. A részecske által keltett elektronok a tér hatására gyorsulni kezdenek a szálak felé, megnövekedett energiájuk miatt ütközve a gázzal további elektronokat keltenek, így a folyamat exponenciálisan ismétlődve elektronlavinaként jelentkezik (Townsend-lavina). A folyamat eredménye  $\text{ArCO}_2$  gázban  $10^4$  szoros erősítés. Az így kapott jel mV nagyságrendű, melyet egy speciális erősítővel tovább erősítünk, amelyet már képesek leszünk mérni.



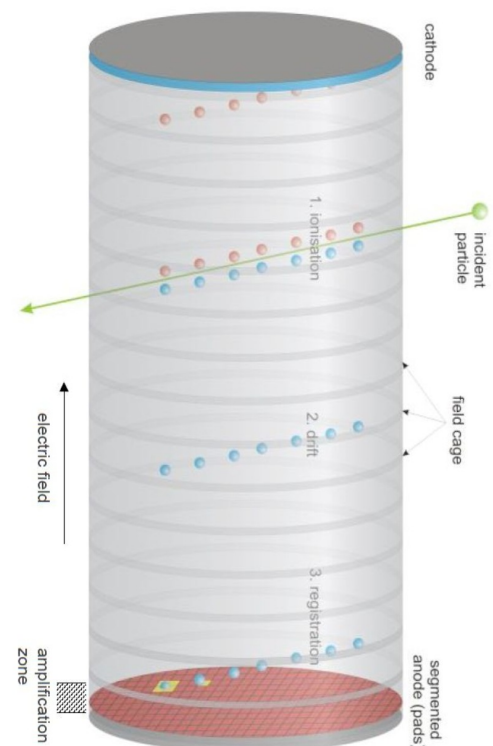
10. Ábra: MWPC szerkezeti felépítése [9]



9. Ábra: Elektron lavina szemléltetése

### 4.2 Time Projection Chamber (TPC)

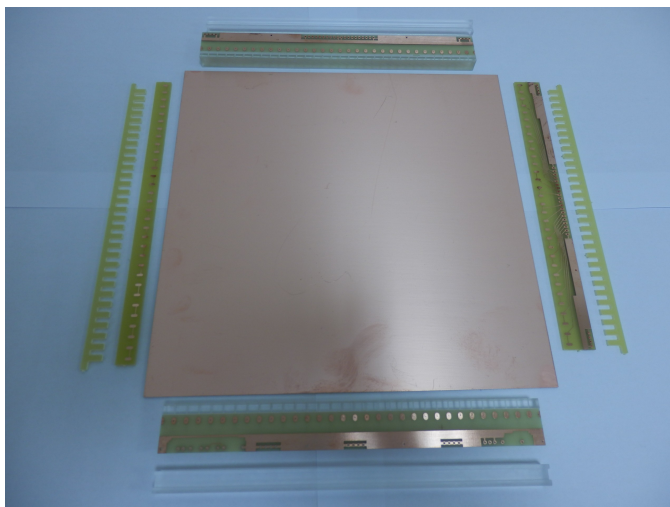
A TPC esetében a keletkezett jel erősítése megegyezik a sokszálú kamrával, ellenben a teljes folyamat kiegészül még két tényezővel, a megnövekedett gáz térfogattal és az elektronok sodródásával. Amennyiben a kamrán áthalad egy részecske, akkor a gázban centiméterenként átlagosan 100 elektront szabadít fel, melyek a részecske irányában hosszú elektronfelhő formájában keletkeznek. A kamra kiegészül egy homogén elektromos térrel, mely az elektronfelhőt meghatározott sebességgel mozgatja lefelé a vékony szálak felé. A szálakhoz közeledve a sokszálú kamránál említett módon erősítjük fel a jelet. A pálya meghatározása 2 dimenzióban történik, melyből az egyik dimenziót a szálak pozíciói jelentik, a másik dimenzió pedig az időfelbontás és a sodródási sebesség függvénye.



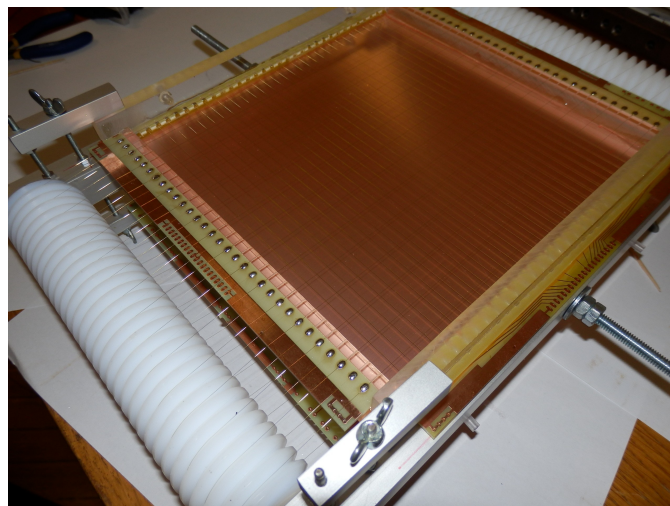
11. Ábra: TPC detektor működési elve

Mivel kiolvasás sebessége befolyásolja a részecskedetektálás precizitását, a sodródás pedig aránylag gyors (körülbelül 1cm egymilliomod másodpercenként) ezért a TPC-nél különösen fontoson a gyors és stabil kiolvasórendszer.

**Építési folyamat:** A detektor építéséhez először egy MWPC alapját kellett elkészíteni, melynek első lépése a rézfóliás üvegszál erősítésű epoxi lemezek (standard nyomtatott áramkörök anyaga) és plexi rudak méretre vágása, illetve az előre legyártott plexi száltartók felragasztása. A legérdekesebb lépés a szálak megfeszítése és elhelyezése: ez egy tekerésre alkalmas szerszámmal történt. Ez a legkritikusabb feladat a detektor építésénél, mivel 20, illetve 100  $\mu\text{m}$  vastagságú szálakkal dolgozunk, melyek mechanikailag nem túl erősek, és a ragasztás utáni elszakadásuk a detektor végleges tönkremeneteléhez vezet. Második lépés a detektor tetejének és oldalának elkészítése, melynek a gázzáró ragasztása figyelmet igényel. A TPC-ben biztosítandó homogén elektromos teret azonos távolságra elhelyezett réz szalagokkal értük el, amit a plexi doboz belső oldalára ragasztottunk rá. A réz csíkok között konstans feszültségkülönbséget biztosítottunk egy ellenálláslánccal.



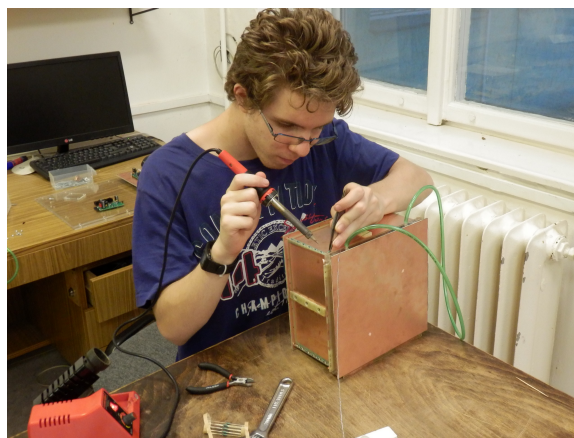
12. Ábra: 2 dimenziós MWPC alap alkatrészei.



13. Ábra: A 2 dimenziós MWPC szálainak rögzítése a detektorváz segítségével.

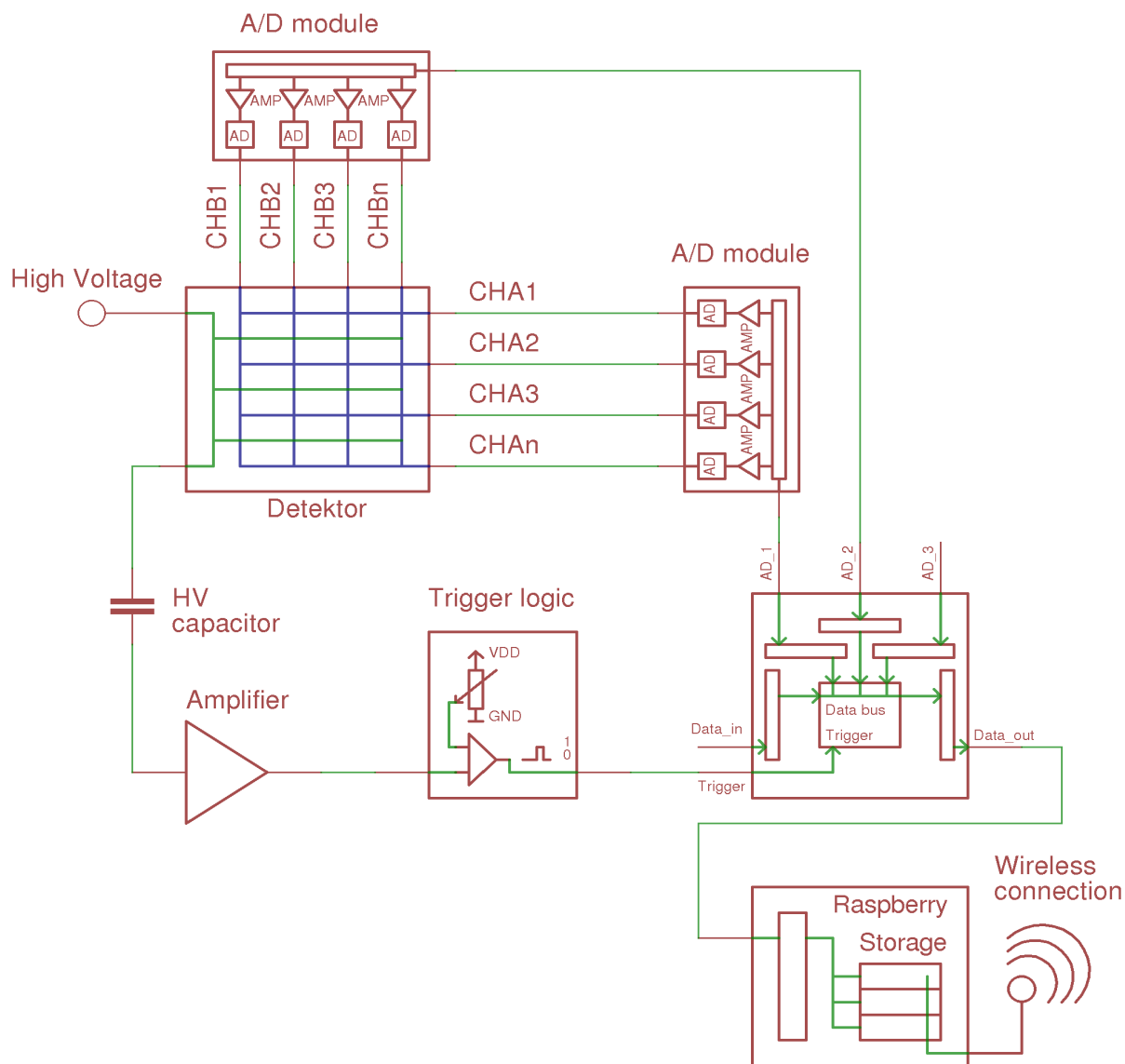


15. Ábra: A TPC oldalfalának ráhelyezése az MWPC alapra, a ragasztás után számít már TPC-nek.



14. Ábra: A homogén elektromos teret biztosító ellenálláslánc forrasztása a detektor oldalfalára.

## 5. Detektorrendszer logikai vázlata



16. Ábra: A TPC detektorhoz tartozó rendszer logikai vázlata

A mérés megkezdéséhez először a mérés időpontját kell meghatározni. Erre számos módszer létezik:

- Külső detektor használata: Célszerűen szintillátor akár MWPC is lehet.
- Belső trigger: A detektor saját jelére való mérés indítás.

Belső trigger esetén a detektor anód szálain azonos módon jelenik meg a jel mint a katódon, azon különbséggel, hogy az anód szálak össze vannak kötve, így ha bármely szálát érinti a részecske akkor jelezni fog. Mivel az anód szálak 1500+ volt feszültségen vannak, így egy nagyfeszültségű kondenzátor segítségével le kell választani a DC összetevőt. A jelet felerősítem és bevezetem egy trigger logikába, mely összehasonlítja a jelerősséget egy állítható feszültség szinttel és az alapján egy logikai impulzust küld ki a vezérlő modul számára. Amint a vezérlő megkapja a mérést indító jelet, az A/D modulok segítségével kiolvassa mindkét szálcsík információit és továbbküldi a Raspberry Pi számára tárolásra. Végül soron számítógéppel vezeték nélküli kapcsolat segítségével az adatok letölthetők.

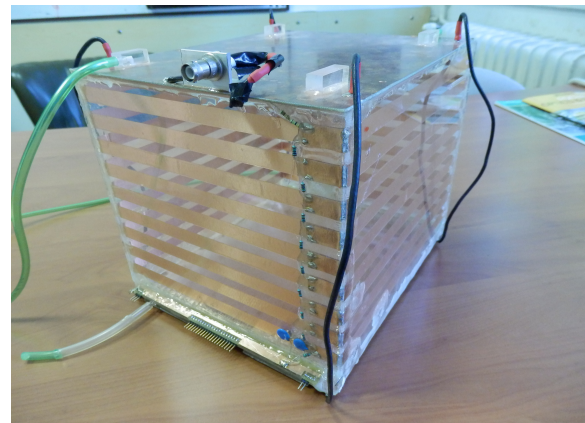
## 6. Detektor fejlesztési fázisai

**1) MWPC:** A fejlesztés első fázisa egy, a REGARD által tervezett Multi Wire Proportional Chamber építése volt. Tekintettel hogy a detektor működése már ismert volt és kiválóan működött, így a kiolvasórendszerem programozása, tesztelése ezen a detektoron kezdődött. A rendszer fejlesztése egészen addig tartott, míg nem volt képes a REGARD egy másik kiolvasórendszerének az eredményeit reprodukálni.



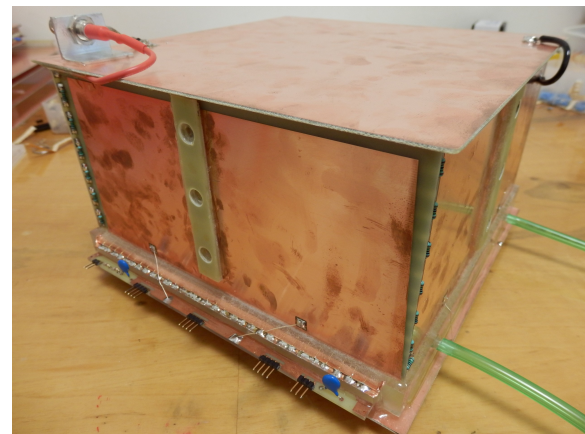
17. Ábra: MWPC detektor

**2) TPC 2D:** A gyors kiolvasórendszer lehetővé tette a TPC vonal fejlesztését, így a következő fázis egy prototípus TPC építése volt. Építettem egy egyszerűsített 2 dimenziós időprojekciós kamrát és megvizsgáltam a paramétereit. A vizsgálatok elvégzéséhez ki kellett egészítenem a kiolvasórendszert egy új funkcióval (gyorsítótárral) egyaránt. Mérések sorozatával bebizonyítottam hogy alkalmas részecske detektálásra, akár még egyszerű hegesztő gázzal is.



18. Ábra: 2 dimenziós TPC detektor (alapja sima MWPC)

**3) TPC 3D:** A Tényleges analízis ennél a detektornál vált lehetővé, az eddigi eredményeket összeraktam egy detektorba ami jó hatásfokkal képes műion tracking feladatokat ellátni. Plexi oldalfalait rézfóliás üvegszál erősítésű epoxi lemezekre cseréltem, mely mechanikailag stabilabb és jelentősen csökkent a zajt. Három szálsíkkal rendelkezik egy helyett. Két detektálási sík, illetve egy belső zajvédelemre. Oldalfalain vékony fóliával lezárt furatokat helyeztem el hogy béta forrással megfelelő módon lehessen kalibrálni.



19. Ábra: 3 dimenziós TPC detektor (alapja 2D-s MWPC)

Mechanikailag stabilabb, 2 dimenzió helyett 3 dimenzióban (2x2D) detektálja a részecskepályát és nagyságrendekkel kisebb zajtényezővel rendelkezik.

## 7. Kiolvasó rendszer (DAQ)

### 7.1 Felépítése

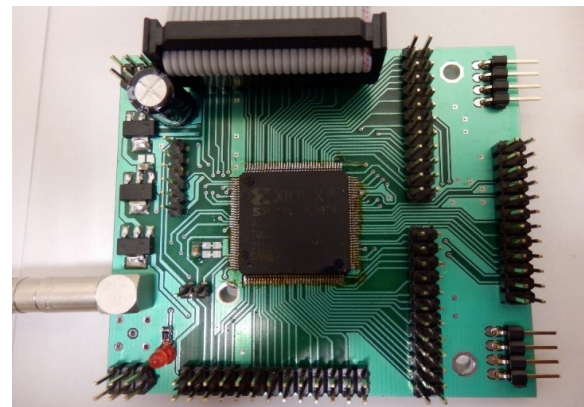
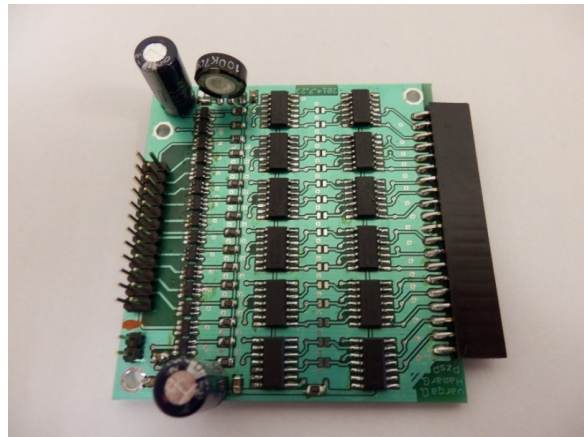
A kiolvasó rendszer feladata a mérendő jelek erősítése, digitalizálása, az adatok kezelése, illetve tárolása. Ehhez egy moduláris rendszert alakítottam ki, melynek alegységei egyaránt fejleszthetőek és bővíthetőek. A rendszer három modulból épül fel:

- FPGA [10] alapú vezérlő modul, mely a kommunikáció és a kiolvasás vezérléséért felelős.
- Erősítő, digitalizáló modul (egy panelen lett implementálva a két funkció).
- Raspberry Pi [11] típusú mikroszámítógép, ami a magasabb szintű számításokat hajtja végre.

**Erősítő és digitalizáló modul:** Az erősítő modul 16 csatornát tartalmaz, ahol a csatornák egy speciális integráló erősítőből, egy közös, állítható DC összetevőből, illetve egy digitalizálóból épülnek fel. A CD4069-es CMOS integrált áramkörön alapuló erősítő a REGARD kutatócsoport fejlesztése, a modul minden egyéb eleme saját munkám eredménye. Feladattól függően a panelen megépített verzió választhatóan 100x vagy 1000x erősítéssel dolgozik.

Digitalizálásra AD7477A típusú chipet alkalmaztam, mely 1 MSP (millió mérés másodpercenként) sebességgel dolgozik, és az analóg jelet 10 bites pontossággal adja vissza (3,2 mV felbontás 0-3.3 V tartományban). Későbbi igény esetén használhatóak gyorsabb, pontosabb ADC-k is. A digitalizálók szimultán kezelése az FPGA feladata, melyre később még visszatérek.

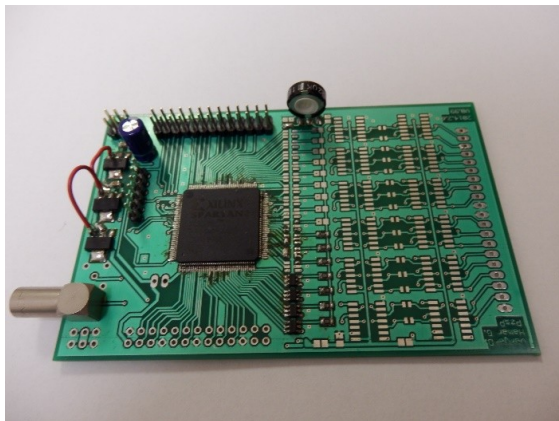
**Vezérlő modul:** Tartalmaz egy 144 lábú Spartan 3 típusú FPGA-t, mely a kiolvasórendszer szíve, továbbá számos elektronikai alkatrészsel van kiegészítve, melynek feladata a vezérlő szükségleteinek kielégítése, mint például a 3 különböző tápfeszültség és az órajel előállítása. A modul végzi az ADC-k (digitalizálók) kezelését és az előfeldolgozott adatot továbbítja a Raspberry Pi típusú adatgyűjtő számítógép felé. Mivel a panel moduláris felépítésű, és I/O lábaira szalagkábelrel lehet csatlakozni, így más feladatokhoz is felhasználható, például más típusú mérő kártyákkal lehet bővíteni a rendszert.



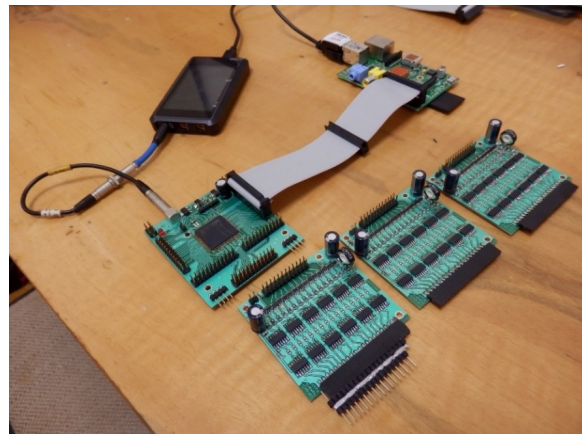
**Kiolvasó számítógép:** A Raspberry Pi egy népszerűvé vált, Linux alapú számítógép, igen kis fogyasztású, olcsó, és ami számunka legfontosabb, nagy számban rendelkezik programozható, gyors működésű I/O (input-output) lábakkal. Feladata az elrendezésben az adatok kiolvasása a vezérlőből, az adatok tárolása, illetve elsődleges analízise. A számítógépen egy komplett operációs rendszer fut: funkciója tehát, hogy a méréseket távvezérléssel kezelhetjük, például SSH-n (standard Linux/UNIX-os titkosított belépési protokoll) keresztül könnyen megoldható volt. A számítógép az interneten keresztül, vagy hot-spot-ként akár okos telefonról is elérhető.



20. Ábra: A Raspberry Pi egy népszerű Linux alapú mikro számítógép.



22. Ábra: Az első kiolvasórendszer prototípusa. Az FPGA lehetőségeinek kihasználatlansága miatt újraterveztem a panelt hogy 16 csatorna helyett 48+ csatorna kezelésére legyen képes.

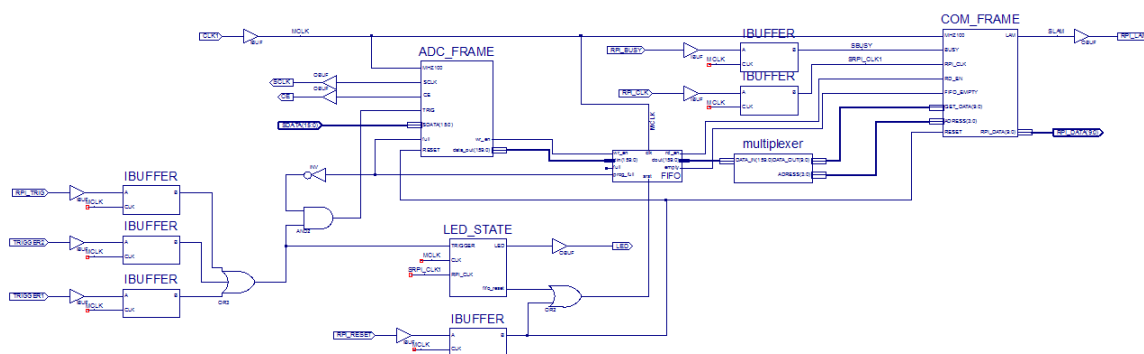


21. Ábra: A teljes kiolvasórendszer mérésre előkészítve. Elődjéhez képest több csatornát kezel és moduláris felépítése miatt egységenként fejleszthető.

## 7.2 Programozás: FPGA logika és a számítógépen futó szoftver

A rendszer programozása több szinten történt, az FPGA-t és a Raspberry Pi-t különböző nyelven és különböző módon kellett programozni.

Az FPGA, mint programozható logika, hardware-szintű programozása hierarchikus rendszerben történt, ráadásul többféle nyelven. Ez azt jelenti, hogy egy hardver leíró nyelven (VHDL) megírtam az eszköz funkcióit modulokra bontva, generáltam hozzájuk egy szimbólumot, és kapcsolási rajzon (legfelső modul) logikailag összekötöttem a modulokat. Ez a módszer azért nagyon előnyös, mivel a modulok újra felhasználhatóak, illetve a kapcsolási rajzon könnyen átláthatóak az eszköz funkciói. Fontos tudni az FPGA programozásról, hogy nagymértékben eltérő a szokványos nyelvektől, ugyanis itt egy hardverre fordul le a program, ráadásul a feladatok („utasítások”) párhuzamosan hajtódnak végre. VHDL nyelven nincsenek utasítások, mindent magunknak kell felépítenünk hardveres elemekből, ráadásul ellenőrizni kell, hogy a fordító ténylegesen, a lehető legcélyszerűbben készítette-e el logikai hálózatot. A fordító munkájának ellenőrzése nagyon fontos feladat, mivel a fordító (vagy a program írójának) egy egyszerűbb „butasága” is rejtett hibákat generálhat. Írtam szimulációhoz VHDL testbench-et, melynek szintaktikája azonos a VHDL-el, ellenben ebben az esetben már alkalmazhatóak magas szintű függvények, de erről a kalibrációnál fogok bővebben írni.



23. Ábra: A vezérlő modul programjának logikai vázlata.

## 7.3 A kiolvasórendszer funkciói

A TPC-hez igazodva 32 csatornát kezel, ellenben a panel jelenlegi állapotában 48 csatorna szimultán kezelésére képes, ráadásul mind ez bővíthető ennek a többszöröseivel.

A Rasoberry Pi által korlátozva a teljes adatforgalom maximum 6 Mb/s, ellenben a beérkező adatmennyiség eseményenként akár 60 Mb/s-nál is több lehet. Szerencsére a részecskék változó és a kiolvasórendszerhez képest lassú intenzitással (műonok ~200 Hz, béta forrás ~25 KHz) érkeznek, így ha a vezérlő modulban elhelyezek egy tároló egységet (gyorsítótárat) a nagy beérkező adatmennyiség számára, akkor utána bőven van a rendszernek ideje elküldeni az adatokat a mikroszámítógépnek. Szóval a gyorsítótár hatására a rendszer képes kezelni a nagy impulzusszerű adatforgalmat is.

Tartalmaz továbbá egy állapotjelző LED-et, ami 3 állapottal rendelkezik:

- A program futását folyamatos világítással jelzi.
- Az egyedi mérés indító jelet (trigger-jelet) lassú váltakozás jelzi.
- A folyamatos mérést gyors, 3 Hz periódusidejű villogás jelzi.

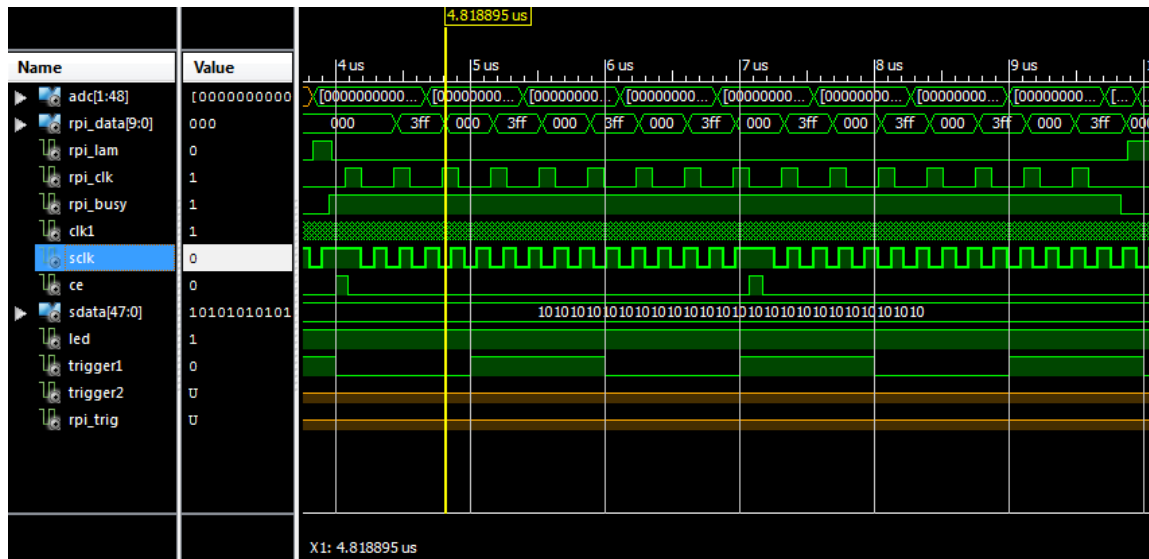
Elláttam a programot egy biztonsági funkcióval, egy úgynevezett Watchdog számlálóval, melynek feladata a vezérlő alapállapotba helyezése abban az esetben, ha nincsen kommunikáció a Raspberry Pi-vel. Ez a modul akkor lehet hasznos, hogyha például kontakt hibás a kábel, vagy éppenséggel kihúzzák a panelből mérés közben, ekkor a vezérlő nem fagy le, hanem alapállapotba helyezi magát. A hiba megszűnése után a rendszer automatikusan visszaáll és folytatja a méréseket.

A mérés indítása parancssorból történik és különböző paraméterek adhatóak a programomnak, melynek funkciói a következők:

- Trig 1: Véletlenszerű mérésindító jel generálása mely a referencia fájl-hoz szükséges.
- Wts 1: Nyers adatok képernyőre írása (Debug esetén használatos)
- Stack c: Egy trigger esetén „c” képet rögzít az eseményről.
- N c: A program „c” esemény felvételéig fut.

## 8. Kalibrálás

Elsőként a kiolvasórendszer működéséről kellett meggyőződnöm, erre számtalan módszert alkalmaztam. Az első lépés a szimuláció volt, a programomat kiegészítettem szimulációs fájlokkal azaz VHDL testbench-el, melynek feladata az erősítő kártya és a Raspberry Pi funkcióinak szimulálása volt. Továbbá hozzá adtam a kódhoz egy egyszerű analízist, mely logikai értékekkel tért vissza egyes csatornák működéséről.



24. Ábra: Vezérlő modul programjának időzítési szimulációja.

A következő lépés MWPC detektoron végzett méréseim voltak, ugyanis ezzel a REGARD csoportnak már sok tapasztalata volt. A mérések megegyeztek a szakirodalommal és a csoport által készített korábbi mérésekkel egyaránt.

A sikeres eredmények következtében a kiolvasórendszert használatba vették PET (Pozitron Emissziós Tomográf) méréseknél is, ahol az adatok szintén megegyeztek a korábbi kiolvasórendszerrel, ráadásul annál körülbelül 100-szor gyorsabb működést elérve.

Miután a kiolvasórendszerem megbízhatóvá vált, kezdődhetek a mérések a TPC detektoron. Két különböző típusú mérést végeztem:

Egyik esetben  $^{90}\text{Sr}$  forrást alkalmaztam, mely béta sugárzással bombázta a detektoromat egy megadott helyen, és a kiolvasásból egyértelműen meghatároztam a forrás pozícióját. Másik mérésemnél kozmikus müonokat mértem, melyhez 2 db szintillátort alkalmaztam. Egymáshoz képest különböző eltolásokkal elhelyeztem egyet a detektor fölött, másikat alatta, és ha mindkét szintillátor egyszerre megszólalt, akkor tudtam, hogy a részecskének milyen irányban kell áthaladnia a detektoron és ekkor indítottam a méréseimet. Az eredmények igazolták, hogy a detektoron a megfelelő irányban haladtak át a részecskék. Az újabb, 3 dimenziós detektoron már külön 6 mm átmérőjű furatokat helyeztem el a lemezen különböző magasságban béta forrással való mérésekhez. Nem elég hogy a kalibráció pontossága jelentősen növekedett, még a drift tér hatásfokát is egyszerűen mérhetővé tette.

## 9. Analízis

### 9.1 Nyers adatok értelmezése

Az analízis megkezdéséhez 2 bemeneti fájlra van szükségünk, a mérési eredményekre illetve az ahhoz tartozó referenciára. Mindkét fájl azonos módon tárolja az információkat, csupán a mérés jellege a különbség.

A referencia fájl a detektor és a kiolvasórendszer paramétereiről tartalmaz információkat mint például a pedesztál (DC összetevő a váltakozó jel méréséhez) és a zajtényező. Létrehozásához üzemállapotba helyezzük a detektort radioaktív forrás nélkül és nagy mennyiségű (10 000+) adatot veszünk fel véletlenszerű időpontokban.

A mérési fájl a detektor szálain megjelent nyers digitalizált értékeket tartalmazza a referenciának megfelelő formátumban.

### 9.2 Cél:

- Részecskék eseményeinek kiválasztása, zajsűrés.
- Adat redukció: Nagy mennyiségű „főlősleges” adat átalakítása kis méretű, értelmezhető formátumba.
- Részecskepálya megjelenítése

### 9.3 Problémák:

Az időprojekciós kamra közel 100%-os hatásfokkal képes detektálni a részecskéket abban az esetben ha a trigger pontos és nincsen zaj. Sajnos a valóságban nem ez a helyzet, már a trigger küszöb beállításánál is megfelelően kell eljárni.

Ha túl magasra veszem a küszöböt, igaz szép eredményeket fog generálni, viszont ennek ára, hogy számos eseményre nem indít mérést. Ellenkező beállítás esetén nem csak részecskére, hanem zajra is indít mérést. A trigger beállításánál ez a két eset között kell megtalálni az optimumot, mely a számolt/mért részecskehozam arányával beállítható. Érdemesebb egy kicsit inkább a zaj tartomány felé közelíteni mint a magas küszöbhez, mivel a zajt még kilehet szűrni, viszont nem létező eseményből a részecskét már „nehezebb” kivenni.

Az analízis során el kell különítenem az értékes eseményeket, illetve az olyan méréseket ahol vélhetőleg nem volt, vagy egyértelműen nem kivehető egy részecske útvonala. De ha ezeket az eseteket jól elkülönítettem egymástól, még akkor sem biztos hogy az esemény teljesen tiszta (zajmentes). Előfordulhat hogy csak egyetlen egy csatorna értéke magasabb mint kéne és egy pontot már olyannyira eltolhat, hogy az egyenes illesztés akár 90°-al is eltolódhat. Ennek kiküszöbölése végett több fázisban is végzek különféle módon zajsűrést. A programnak számos esetben döntenie kell a nem feltétlen egyértelmű események közül. Mi van ha 2 egyenes is van az eseményben? Egyik zaj, másik részecske. Alakjuk azonos, esetleg az energiájuk különböző. Szóval a transzformációk és döntéshozatalok miatt bevezettem egy megbízhatósági indexet is mely utal a mérési eredmény egyértelműségére.

## 9.4 Megvalósítás:

1) Referencia fájl beolvasása: pedesztál (DC offset) és sigma (zajtényező) generálása minden pozíció és időszetekre.

2) Nyers mérési adatok (1 esemény) beolvasása, pedesztál kivonása

3) Energia térkép készítése az eseményről, összehasonlítás a müon által leadható energiával. Három eset lehetséges:

- Ha az energia túl kicsi, akkor csak zajra indítottam mérést, az eseményt eldobom.
- Ha az energia túl nagy, akkor meghatározom hogy van-e részecskepálya, ha igen akkor megpróbálom szétválasztani a zajtól. Siker esetén folytatom a lépéseket, ellenkező esetben eldobom az eseményt. (jelenleg még nincs implementálva)
- Ha az energia 20% eltérésen belül van akkor hiba nélkül megfelelt az első feltételnek.

4) 2x2 dimenziós ábra generálása: ez van legközelebb a nyers adathoz, ellenben szemléletes és biztos hogy a valóságot mutatja mivel nincs benne transzformáció.

4) 3 dimenziós ábra generálása: A 2 különböző szálsík nyers adatait (2x16 érték) átalakítom úgy, hogy az egymást keresztező szálak pontjait legenerálom (16\*16 érték). Ezt a replusz műveletével valósítom meg, mivel ha egy részecske áthalad egy ponton akkor a pontot keresztező szálakon azonos energiát hagy, így a mért érték felét kapom. Ellenkező esetben legalább az egyik szál értéke kisebb lesz, így a mért értéket jelentősen bünteti. Korrigálva az energia veszteségét az alábbi képletet használtam:

$$P_{xy} = \frac{2 \cdot E_x \cdot E_y}{E_x + E_y}$$

A változók a különböző szálsíkok csatornáinak az energiáját jelentik.

4) Clusterezés azaz a beütések (elkülönülő, nagyobb értékek) keresése: Normális esetben egy időszletben maximum 1 beütés keletkezik, ezt feltételezve súlyozott átlaggal megkeresem a beütést, melynek képlete:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i},$$

- „x[i]” a csatorna pozíciója
- „w[i]” az x[i] pozícióhoz tartozó energia
- „n” a maximális csatornák száma

5) Elő zajsűrés: Az oda nem illő (egyenesre nem illeszthető) pontok szűrése egyszerűbb logikával. Ha a szűrőnek valamely pont nem felel meg, akkor az adott időszletet megvizsgálja több beütést keresve:

- Eldobom a pontot ha:
  - A beütések száma kisebb mint 2
  - A beütések száma nagyobb mint 4
  - Egyik beütés sem felelt meg a szűrő feltételének

- 2-4 beütés esetén az előző hibás értékeket nem veszi figyelembe és újra számolja a súlyozott átlagot és megismétli a 6-os lépést.

6) Egyenes illesztés a legkisebb négyzetek módszerével

7) Egyenes illesztés hibájának meghatározása, ha túl nagy akkor:

- Hibás pont keresése, eldobása. Ha a hibás pont nélkül is nagy az illesztés hibája akkor a teljes eseményt eldobom.

8) Objektum generálása: Tartalmazza a részecske pályáját vektorként, energiáját, és egy megbízhatósági tényezőt (milyen feltételek mellett engedte át az analízis).

## **10. Mérési Eredmények, kiértékelés:**

### **10.1 Skálázás:**

2 dimenziós részecskepálya ábrák:

- X tengely: a detektor szélessége 16 részre osztva.
- Y tengely: az eltelt időnek felel meg, ellenben mivel egységnyire állítottam be a sodródási sebességet (részecskéknél a szálak felé való sodródásuk) ezért 1  $\mu$ s megegyezik a detektoromnak 1 cm magasságával.
- CB tengely: a színmélységként jelenik meg és a mért értéket jelenti. Az alap zajtól pozitív értékkel elkülönülő pontthalmaz jelenti számomra a részecske beütést.

2x2 dimenziós részecskepálya ábrák:

- X tengely: megegyezik a detektorom szélességével és hosszával, 2x16 részre osztva. 0-15-ig az „A” szálsíkot, 16-31-ig az azt keresztező „B” szálsíkot jelenti.
- Y tengely: detektor magassága cm-es felbontással.
- CB tengely: színmélységként megjelenő mért érték.

3 dimenziós részecskepálya ábrák:

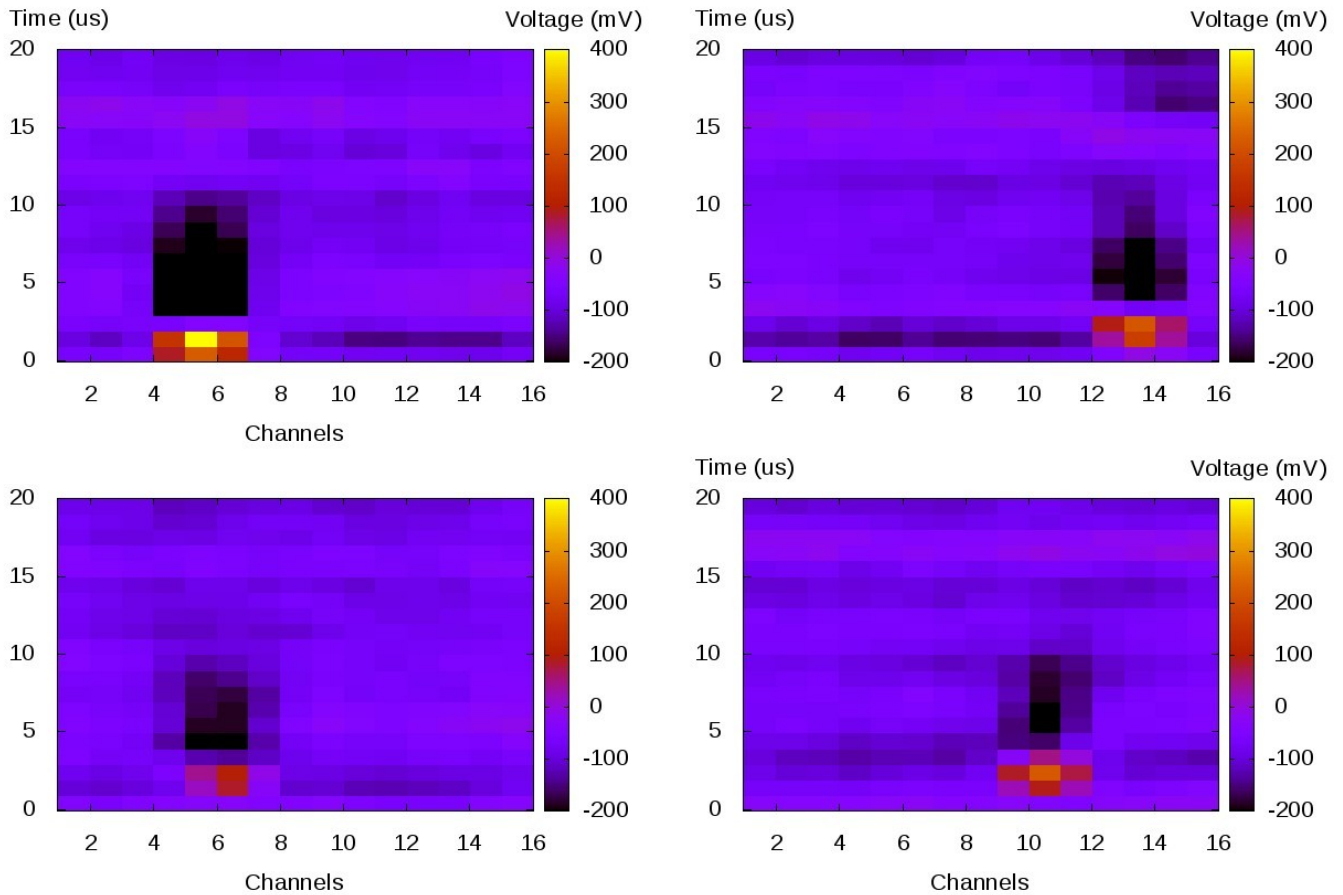
- X tengely: detektor szélességével, 16 részre osztva.
- Y tengely: detektor hossz, 16 részre osztva.
- Z tengely: detektor magassága cm-es felbontással.
- CB tengely: színmélységként megjelenő mért érték.

Egyenes illesztés és pontthalmaz:

- X tengely: a detektor szélessége és hossza, 2x16 részre osztva.
- Y tengely: detektor magassága cm-es felbontással.

## 10.2: 2 dimenziós TPC detektor:

Teszt mérések béta forrással:

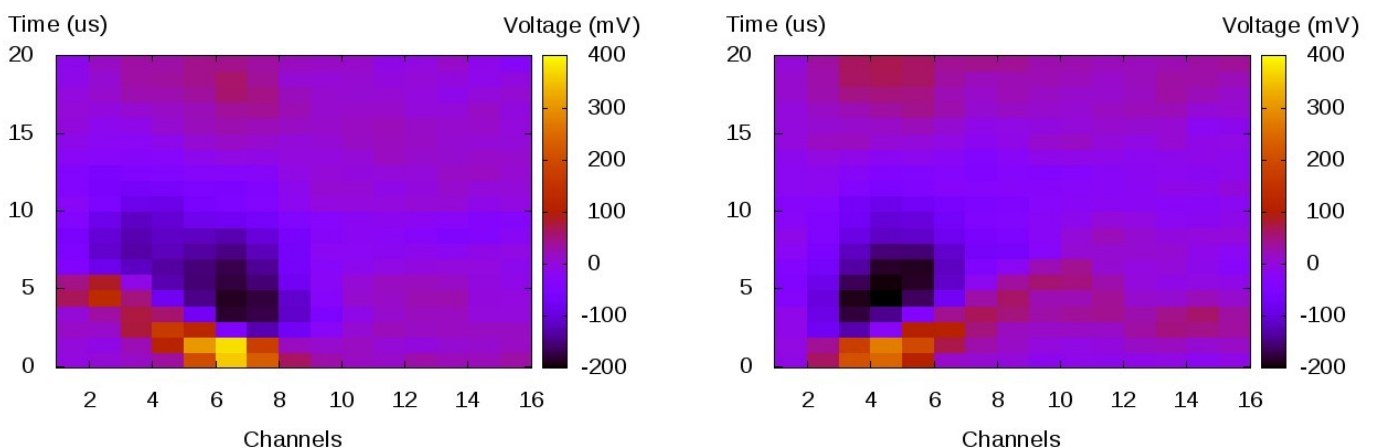


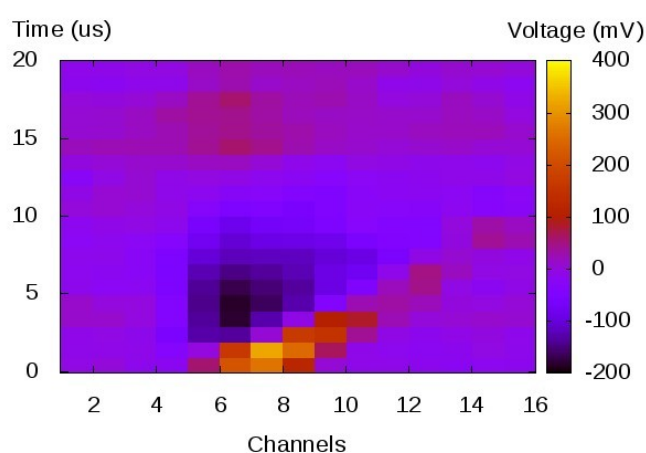
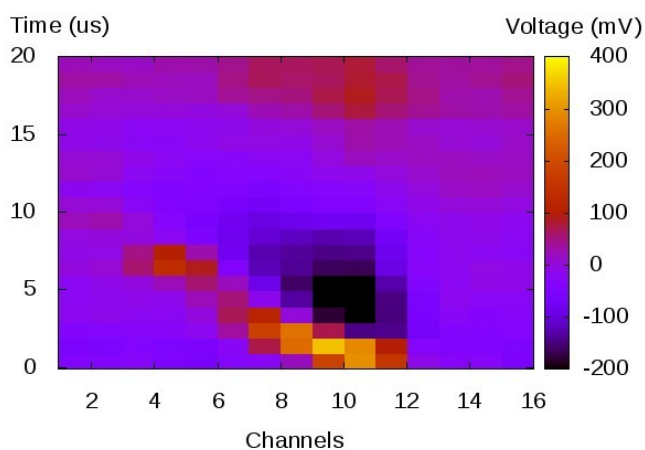
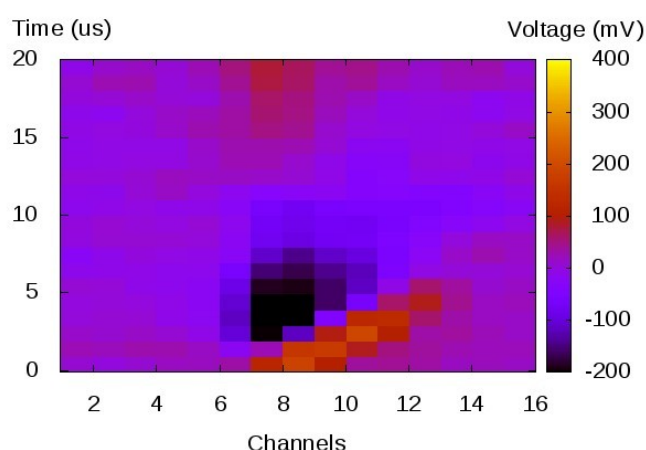
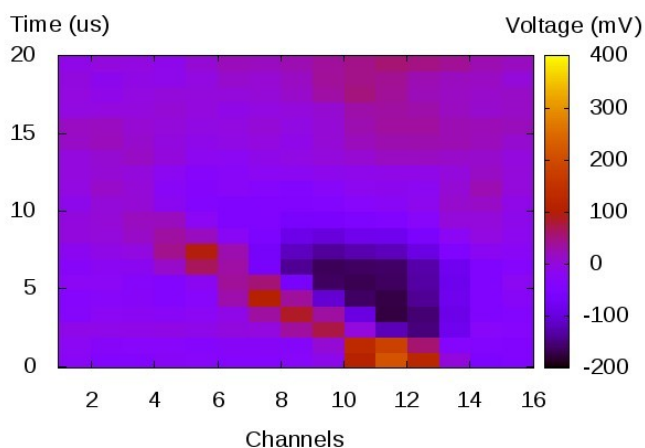
A béta forrással való mérés célja az volt, hogy képes-e a detektor meghatározni a forrás pozícióját. Az első vizsgálat úgy történt, hogy a detektorral szembe béta forrást, mögé szintillátort helyeztem. A forrás a szálakra merőleges irányban bombázta a detektort és az ellen oldalon kilépett elektronok a szintillátorba csapódva generálták az indító jelet. A méréssel képes voltam meghatározni hogy a forrás mikor melyik szál felé sugárzott, de nem kaptam referenciát arról hogy mégis milyen magasan lehetett.

Kozmikus részecskék mérése szintillátorok segítségével:

Bal oldalról érkező részecskék mérése

Jobb oldalról érkező részecskék mérése



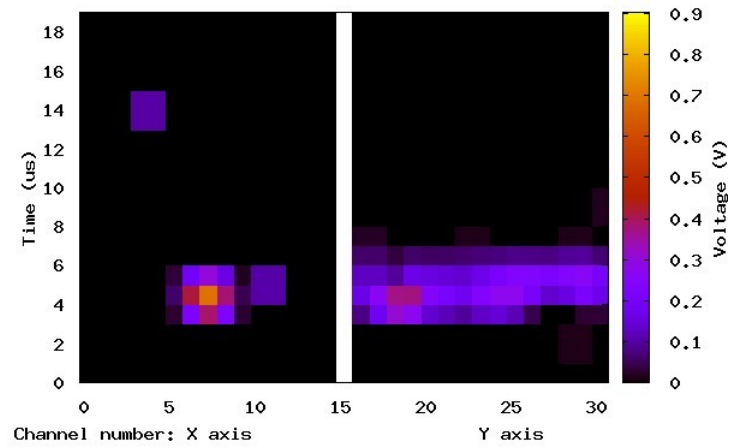


Kozmikus mérésekhez szintillátorokat alkalmaztam referenciának, ha mindkettő szintillátor egyszerre megszólalt tudtam, hogy egy részecske pályája mindkettőt keresztezte. Elhelyeztem egyet a detektor felett, egyet alatta és az eltolás szögéből tudtam következtetni a pálya irányára. A mérésekből kiderült, a hatásfok a detektálási terület magasságával arányosan romlik, 5 cm fölött már nehezen, 10 cm fölött már nem volt érzékeny a detektor. A jelenlegi kiolvasórendszerrel ez 5, illetve 10 pontnyi információt jelent a részecskéről. Amennyiben zaj is van a rendszerben, márpedig jelenlegi detektorban jelentős mértékű zaj volt, abban az esetben 5 pont nem elegendő a megbízható pályameghatározáshoz.

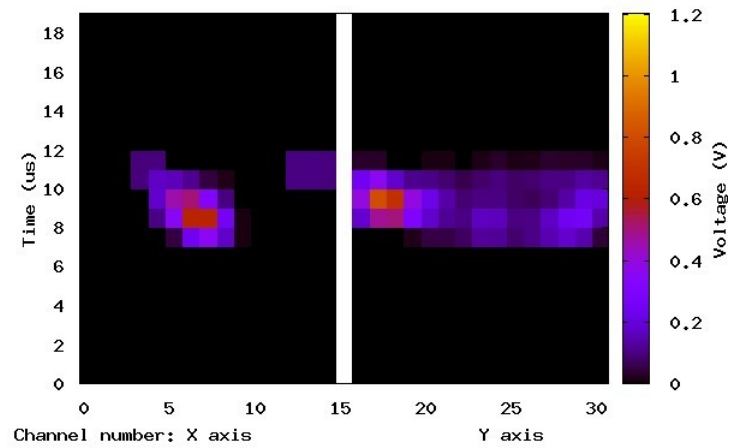
**Belső trigger:** A belső trigger a detektor egy olyan alkalmazása, mikor nem külső detektor rendszert alkalmazunk trigger generálására, hanem analóg elektronikával a saját maga által generált jelekből határozzuk meg a mérés kezdetének időpontját. Csak a detektor paramétereinek pontos ismeretében állítható be megfelelően. Jelen esetben megvalósítható volt, ellenben a detektor zajossága miatt nem került rá sor, inkább megbízható, külső referenciát alkalmaztunk.

### 10.3: 3 dimenziós TPC detektor:

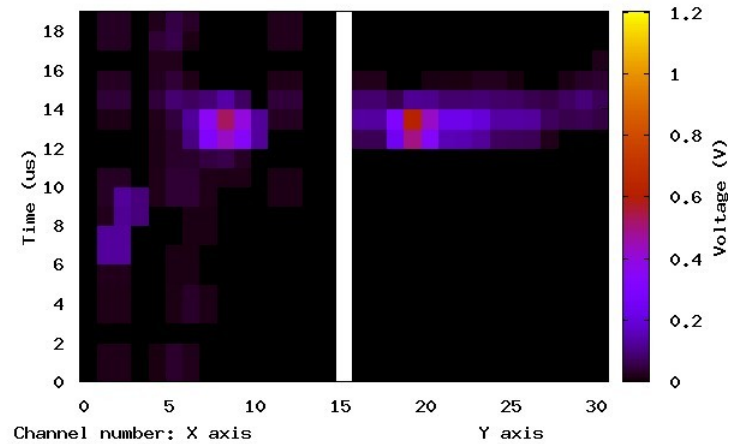
Kalibráló mérések béta forrással:



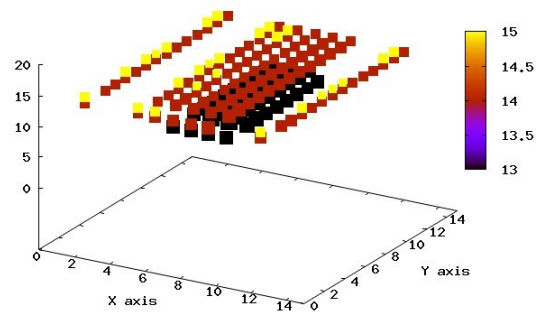
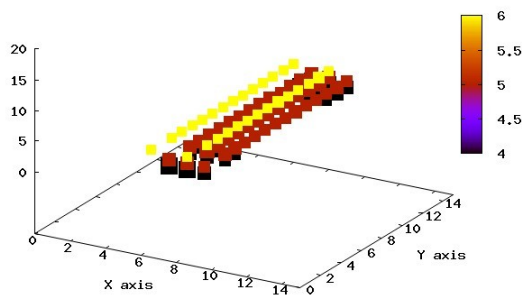
25. Ábra: Béta forrás elhelyezve az alsó furathoz



26. Ábra: Béta forrás elhelyezve a középső furathoz



27. Ábra: Béta forrás elhelyezve a felső furathoz

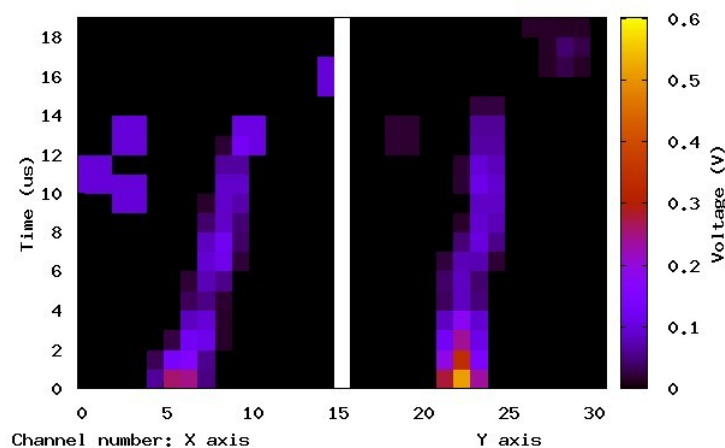


29. Ábra: Béta forrás elhelyezve az alsó furathoz

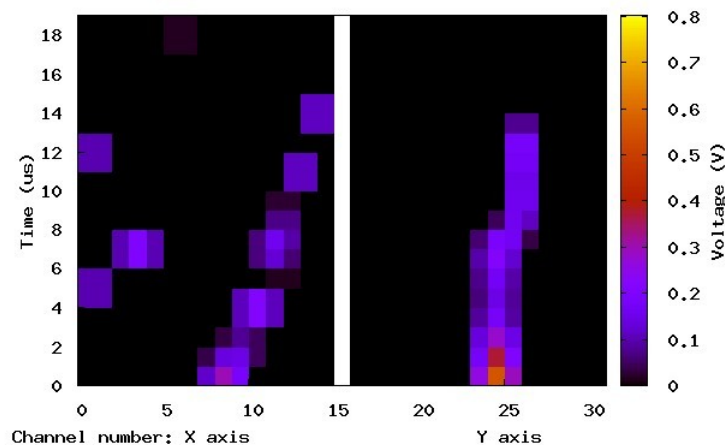
28. Ábra: Béta forrás elhelyezve a felső furathoz

Az újítás Ezen méréseknél az volt, hogy fix pozícióban elváltak helyezve furatok a detektoron, pontosan tudni lehetett a forrás pozícióját és a detektor ellen oldalán egy pontosabb szintillátort helyeztem el. A mérésekkel kilehetett mutatni a magassággal arányos energia veszteséget és a zaj növekedését egyaránt.

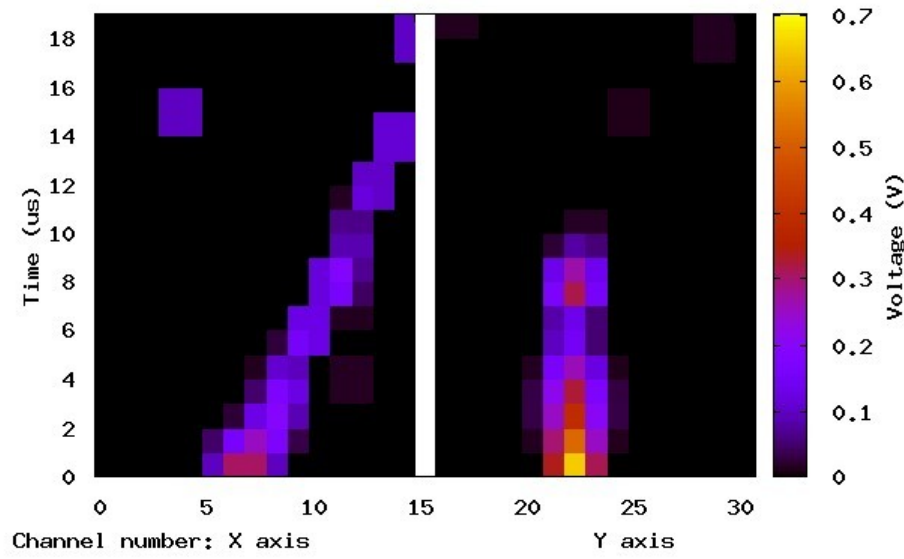
Kozmikus részecskék mérése:



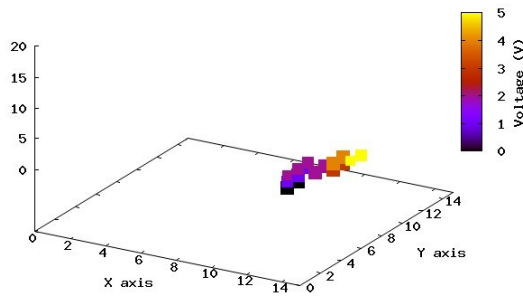
30. Ábra: Jobb oldalról érkező kozmikus részecske



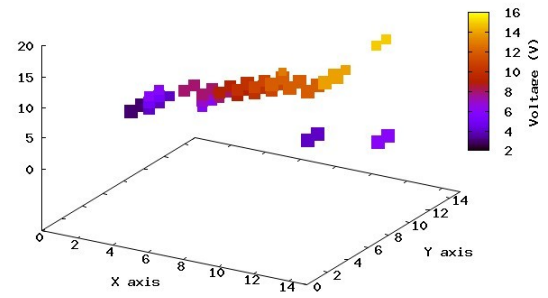
31. Ábra: Jobb oldalról érkező kozmikus részecskék



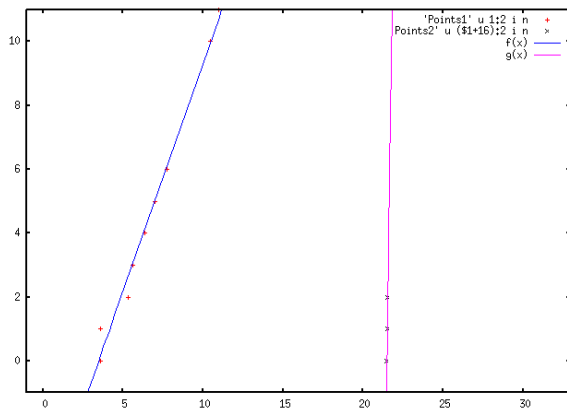
32. Ábra: Jobb oldalról érkező kozmikus részecske.



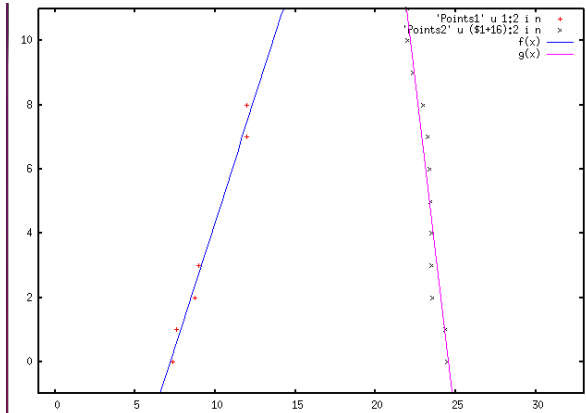
34. Ábra: Jobb oldalról érkező kozmikus részecske.



33. Ábra: Jobb oldalról érkező kozmikus részecske.



35. Ábra: Egyenes illesztés jobb oldalról érkező részecske adataira.



36. Ábra: Egyenes illesztés jobb oldalról érkező részecske adataira.

A mérés művelete megegyezett az előző detektorral, ellenben a végeredmény jóval kecsgetetőbb volt. Nagyságrenddel kisebb zaj és jobb hatásfok jellemezte a detektor, itt már közel minden esetben megmaradt a jel mind a 10 pontban.

Belső trigger: Ezen detektor már képes saját magára mérést indítani a kis zajszint miatt, ellenben ezen tulajdonságának a mérésére csak később kerül sor.

Egy fontos tudnivaló a TPC-vel kapcsolatban, legyen bármely kiváló is a detektor, általában külső trigger forrást alkalmaznak. Ennek az az oka, hogy mérést csak akkor képes indítani ha a részecske, vagy annak lenyomata áthaladt a detektálási rétegen, a szálakon. Ez azért probléma, mert így rendelkezik egy igen csak nagy vakfolttal, ha például egy oldalirányú (pl vízszintesen érkező) részecske keresztezi a detektort, akkor az igaz észlelni fogja miután az elektronfelhő leért a detektálási területre, ellenben nem fogja tudni hogy a tényleges beütés mikor történt, mégis milyen magasan haladt át rajta a részecske, azaz vannak esetek mikor a vektor meredeksége mérhető, de a kezdőpontja nem. Műon tracking alkalmazásnál ez nem jelent nagy problémát, ugyanis a merőlegességnél  $45^\circ$ -nál nem jellemző nagyobb eltérés.

## 11. Összefoglalás

Megterveztem, legyártottam, felprogramoztam a kiolvasórendszert és két példányt készítettem belőlük.

Jelentős részt vállaltam a TPC detektor tervezésben és a REGARD csoport által készített detektor váz segítségével építettem egy 2 dimenziós és egy 3 dimenziós időprojekciós kamrát. A kiolvasórendszer működését szimulációval és tesztmérésekkel egyaránt igazoltam.

Számos mérés segítségével kalibráltam a detektort és a kiolvasórendszert mint egy egységes rendszer.

Írtam egy programot adat analízisre, mely a kapott eredményeket szűri, feldolgozza és a részecskepályákat:

Megjeleníti 2x2 dimenziós ábrán

Megjeleníti 3 dimenziós ábrán

Objektumként legenerálja, mely felhasználható fizikai analízishez.

További tervek:

- DAQ funkcióinak bővítése, mint például az adat tömörítés.
- Analízis:
  - o funkcióinak bővítése: Zajra „ráült” track különválasztása
  - o Intelligens szűrők
- További dokumentált tesztek elvégzése, paraméterek felvétele.
- Tényleges terepmunkára való alkalmazás fejlesztése.

## 12. Hivatkozások

- [1] <http://home.cern/about>
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_Model](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model)
- [3] Galgóczi Gábor  
TGEM alapú Cserenkov-detektorok fejlesztése  
TDK dolgozat, ELTE TTK (2014)
- [4] <https://alice-collaboration.web.cern.ch/>
- [5] Oláh László:  
Földalatti üregek vizsgálata kozmikus részecskék vizsgálatával  
OTDK dolgozat, ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék (2011)
- [6] L. Oláh, G. G. Barnaföldi, G. Hamar, H. G. Melegh, G. Surányi, D. Varga  
Close Cathode Chamber technology for cosmic particle tracking  
24th European Cosmic Ray Symposium, Kiel, proceedings (2014)
- [7] Oláh László  
Szerkezetvizsgálat kozmikus részecskék segítségével  
MSc diplomamunka, ELTE (2012. 05.)
- [8] H. Tanaka et al.:  
Development of a portable assembly-type cosmic-ray muon module for measuring the density structure of a column of magma
- [9] Dezső Varga, Zoltán Gál, Gergő Hamar, Janka Sára Molnár, Éva Oláh and Péter Pázmándi  
Cosmic muon detector using proportional chambers  
Eur. J. Phys. 36 (2015) 065006.
- [10] <http://www.xilinx.com/>
- [11] <https://www.raspberrypi.org/>