

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Természettudományi Tanszék



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

GAMMA SPEKTROMÉTER TERVEZÉSE ÉS ÉPÍTÉSE

Szerző: **Szécsy Levente Sándor**
villamosmérnök BSc. szak, II. évf.

Konzulens: **Dr. habil. Rácz Ervin**
egyetemi docens

TÉMAVÁLASZTÁS	3
BEVEZETŐ.....	3
ELMÉLETI BEVEZETŐ AVAGY	4
AMIT A RADIOAKTIVITÁSRÓL TUDNI KELL	4
AZ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁS FAJTÁI	5
ALFA SUGÁRZÁS.....	5
BÉTA SUGÁRZÁS, AVAGY NEGATÍV BÉTA SUGÁRZÁS	6
GAMMA SUGÁRZÁS	6
AMIT AZ IONIZÁLÓ ELEKTROMÁGNESES SUGÁRZÁSRÓL TUDNI KELL	6
MÁSOK ÁLTAL KÉSZÍTETT MŰSZEREK	7
IONIZÁLÓ SUGÁRZÁS MÉRÉSÉRE HASZNÁLHATÓ ANYAGOK	11
SZILÍCIUM ALAPÚ SUGÁRZÁS MÉRÉS.....	13
MŰSZER KÖVETELMÉNYEK	14
ALKATRÉSZEK VÁLASZTÁSA	14
A MŰSZER MIKROKONTROLLERE.....	14
A SUGÁRZÁST MÉRŐ ESZKÖZ	16
A JELERŐSÍTŐ.....	16
KOMPARÁTOR ÉS TRIGGER JEL	17
A MŰSZER FELÉPÍTÉSE	18
TÁPELLÁTÁS.....	18
A MŰSZER KAPCSOLÁSA.....	21
A MŰSZER SZOFTVERE	22
A MŰSZER KALIBRÁLÁSA.....	26
KVARKOK A KOZMIKUS SUGÁRZÁSBAN [19]	28
MŰONOK KELETKEZÉSE [19].....	28
MŰONOK DETEKTÁLÁSÁNAK FOLYAMATA.....	29
A MÉRÉS FELÉPÍTÉSE	29
A MÉRÉS FOLYAMATA	32
A RELATIVITÁSELMÉLET ALÁTÁMASZTÁSA, A MŰONOK BOMLÁSÁNAK MÉRÉSE	34
A MÉRÉS KONKLÚZIÓJA	39
FORRÁSOK:	40
SAJÁT EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA ÉS SAJÁT MAGAM ÁLTAL ELVÉGZETT MUNKÁK LISTASZERŰ ÖSSZEFOGLALÓJA.....	43
SAJÁT EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA:	43
SAJÁT MAGAM ÁLTAL ELVÉGZETT MUNKÁK:.....	43

Témaválasztás

Sokak számára az atomfizika egy olyan terület, amely távolról nagyon érdekesnek hangzik, de emellett persze rendkívül bonyolult is. Éppen ezért nem sokan foglalkoznak vele mindaddig, amíg nem tanultak róla részletesen, vagy jöttek rá, hogy igazából nem is olyan nehéz terület ez.

Én személy szerint több mint tíz éve foglalkozom elektronikával, többnyire hobbi szinten. Ez idő alatt mindig próbáltam olyan eszközöket építeni, amely más, mint az átlagos érdeklődési kör. Ilyen műszerek voltak a radiológiai műszerek, amelyekből legelsőnek egy egyszerű Geiger-számlálót építettem, mégpedig a SBM-20-as Geiger-cső adatlapjában található kapcsolási rajz alapján. Ezzel indult az érdeklődésem a témában.

Egy évre rá, már a Puskás Tivadar Távközlési Technikum rádióamatőr szakkörén építettem hasonló műszert egy „Can-Sat” műholdhoz. Itt már olyan továbbfejlesztett kapcsolással dolgoztam, amelyet saját magam találtam ki. Ennek a szakkörnek kapcsán ismertem meg Dudás Levente tanár urat, aki számos műhold építő projektben részt vett. Ő mutatta be számomra azt az érdekes sugárzásmérő módszert, amely teljesen másképp működik, mint egy Geiger-számláló, és közben semmilyen bonyolult eszközt nem használ. A célom az, hogy ne csak egyszerűen sugárzást mérjek majd, hanem valamely gamma sugárzás energiáját fogom karakterizálni, ami alapján a teljes spektrumról kapunk majd információt.

Mit lehet kezdeni egy ilyen műszerrel? Felfedezhetjük vele pl. a sugárzó anyagok összetételét, beléphetünk a kozmikus sugárzás világába, és megvizsgálhatjuk majd miként viselkednek a részecskék az ilyen szinte elképzelhetetlen körülmények között.

Bevezető

Ebben a dolgozatban egy olyan lehetőséget fogok megvizsgálni, majd ezen alapokon működő műszert tervezni és építeni, amely képes sugárzás mérésre egyszerű szilícium alapú alkatrészekkel. Mindemellett a műszer nem csak nagyon olcsó, hanem egyszerű felépítésű is lesz. A dolgozat második felében ezen alapokon működő műszer segítségével a speciális relativitáselmélet idődilatációs elméletének törvényét próbálom majd a közel fénysebességgel mozgó részecskék világában demonstrálni.

Célom egy olyan eszköz építése, amely képes sugárdózist mérni, és ebből a mért dózisból képes egy intenzitás – hullámhossz spektrumot felvenni. Célom továbbá, hogy a műszerem könnyen integrálható legyen hordozható eszközökbe, ilyen módon tehát kis méretű, és olcsóbb is legyen, mint bármely más már elterjedt megoldás. Mindezt úgy érem el, hogy közben a mért értékek megfelelő pontosságúak legyenek.

Jelenleg két fő módszer van a sugárzás mérésére és karakterizálására. A legdrágábbak, de egyben legpontosabb megoldást a szcintillátor kristályos mérőeszközök adják, de a legelterjedtebbek viszont a Geiger-csőes műszerek.

A szcintillátor kristályos műszerek egy gamma foton részecskét „alakítanak át” fényérzékelő eszközök által érzékelhető fotonokká egy valamilyen erre alkalmas kristály segítségével. Mivel ez a fénymennyiség igen csekély, ezért egy fotontöbbszöröző vákuumcső segítségével ezt felerősítik, majd az így felerősített foton mennyiséget mérik. Ehhez egy nagy

méretű kristály és egy nagy méretű fotontöbbszöröző szükséges. Ezeknek a műszereknek az ára nem csak igen magas, de méretük miatt nem használhatóak például hordozható eszközökben. Ezen felül, az ilyen méréshez egy nagyfeszültségű tápegység is kell, mivel a többszöröző cső működése a nagyfeszültségen történő elektron emissziós jelenséget használja.

Legelterjedtebb fajta módszer a Geiger-csőves műszerek használata. Ennél a módszernél a gamma foton részecskék ionizáló tulajdonságát használjuk fel. Egy szigetelő gázzal töltött csőben két elektródára nagyfeszültséget kapcsolunk, és abban az esetben, ha egy ilyen részecske áthalad ezen a gázon, egy ionizált csatornát hoz létre, és áram folyik a két elektróda között. Ez a megoldás kevésbé pontos, viszont relatív olcsó módszer a sugárzás mérésre és vizualizálására. Ennek ellenére ez a technika még mindig nem tökéletes megoldás, mivel egy Geiger-cső nagy méretű és működéséhez ugyan úgy szükséges a nagyfeszültségű tápegység.

Egy ideális megoldás lehet a jelen dolgozatban leírt műszer. Az ionizáló részecskék minden útjukba kerülő anyagot ionizálnak. Tehát, ha van két rétegünk, amely elektromosan vezető, és ezeket egy szigetelővel választjuk el, akkor a rajta áthaladó ionizáló részecske egy vezető sávot hoz létre. Ezen a sávon keresztül áramot tudunk átvezetni, amelynek nagyságát mérni tudjuk, ha a szigetelő két végén egy-egy vezető réteget használunk. Esetünkben egy nagy felületű PN átmenetet (diódát) fogunk használni, alacsony feszültségű töltéssel és egy erősítő fokozattal. Ez azt jelenti, hogy egy kis méretű eszközzel, alacsony feszültségen, megfelelő pontossággal tudunk mérni.

Ezt az eszközt megfelelő programmal használva a részecskék energiájának mérésére fogom tudni használni majd, amiből gamma intenzitás – hullámhossz spektrumot tudok készíteni. Ennek a spektrumnak a segítségével leszek majd képes karakterizálni a mért részecskéket és a kozmikus sugárzás vizsgálatával összehasonlítom a speciális relativitáselmélet idődilatációs elméletét.

Elméleti bevezető avagy

Amit a radioaktivitásról tudni kell

A radioaktivitás az instabil atomok bomlásából származó részecskékből ered. Minden olyan atom, amelynek alapállapotú felépítéséhez képest túl sok energiája van, instabilnak tekinthető, és ennek következtében a fölös energiát le szeretné adni. Az ilyen instabil atomok radioaktív bomláson mennek keresztül, amelynek következtében ionizáló sugárzást bocsátanak ki. Ez az energia leadási forma megvalósulhat egy atom, egy elektron, egy neutron vagy elektromágneses hullám leadásával, pontosabban kisugárzásával. A bomlás fajtája határozza meg mely módon történik az energia leadás, mivel minden részecske más-más energia mennyiséget igényel.

Az instabil anyagok bomlási sugárzása véletlenszerű, így csak valószínűségi képlettel lehet leírni. A valószínűségi képlethez szükségünk van az adott anyag bomlási állandójára. A bomlási állandó definíciója a következő képlet alapján lehetséges [1]:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_f}$$

- λ : a bomlási állandó
- T_f : az anyag felezési ideje [s]

Ezen képlet mondja ki, hogy egy anyag milyen gyorsan veszíti el radioaktív képességét és válik instabilból stabil anyaggá.

Ha meg van a bomlási állandó, akkor ki tudjuk számolni az adott anyag bomlásának valószínűségét a következő képlettel [2]:

$$P = e^{(-\lambda \cdot t)}$$

- P : a bomlás valószínűsége
- λ : a bomlási állandó
- t : eltelt idő [s]

A képlet alapján látható, hogy az instabil anyag bomlásának valószínűsége exponenciálisan csökken a létrejöttüktől számított idő elteltével. Ehhez hasonlóan a későbbiekben bemutatott kozmikus sugárzást okozó részecskék bomlása is exponenciális módon történik.

Az ionizáló sugárzás fajtái

Az ionizáló sugárzás attól ionizáló, hogy az ionizáció során kibocsájtott részecske töltést hordoz, vagy mert a kibocsájtott sugárzásnak akkora az energiája, hogy azt képes átadni más részecskéknek, azaz ezáltal ionizálja őket. Ezen ionizáló tulajdonsága miatt vagyunk képesek érzékelni e féle sugárzás fajtákat. Az ionizáló sugárzásnak három fő fajtája van [2] [3]:

Alfa sugárzás

Alfa sugárzás esetén az instabil anyag egy relatív nagy részecskét bocsájt ki. Ez a részecske két protonból és két neutronból áll össze. Ebből adódóan az atomi tömege 4, azaz egy hélium atommag. Ezt a részecskét hélium négynek, avagy alfa részecskének hívjuk.

Mivel ennek a részecskének nincs elektronja, a töltése duplán pozitív. Emiatt a részecske egy statikusan töltött elektródának a negatívan töltött része felé fog vonzódni.

Az alfa sugárzásnál a részecske tömege mindig ugyanannyi, tehát a részecske energiáját annak sebessége fogja meghatározni. Az alfa részecskék körülbelül a fény vákuumbéli sebességének a 4-8 százalékával haladnak, így energiájuk tipikusan 4-11 MeV körül van. Méretéből adódóan a sugárzás ezen formája relatív kis távokat tud megtenni, 2-5 cm-t levegőben.

Béta sugárzás, avagy negatív béta sugárzás

Negatív béta sugárzás esetén az instabil anyag egy elektront bocsájt ki. Az ilyen típusú bomlásnál egy neutron átalakul protonná, melynek során egy elektron szabadul fel, amelynek töltése egyszerűen negatív. Az ebből a folyamatból felszabaduló energia az elektron mozgási energiájában jelenik meg, hasonlóképpen, mint az alfa sugárzásnál. A negatív béta részecskék energiája tipikusan 0,1-2 MeV.

Mivel méretük jóval kisebb, mint az alfa részecskéé, ezért a hatótávuk is nagyobb, 2-7 métert képesek megtenni levegőben.

Gamma sugárzás

Gamma sugárzás esetén nem egy részecske válik ki az anyagból, hanem energia hagyja el az atomot elektromágneses sugárzás (vagy foton) formájában. Ez a (kísérő) jelenség történhet alfa és béta bomlás/sugárzás esetén is. Ezen bomlások folyamatában nem minden energia a kibocsájtott részecskék kinetikus energiájában jelenik meg, hanem gamma sugárzás formájában is testet ölthet.

A gamma sugárzás energiája arányos az anyag által kibocsátott energiával és minden anyag bomlásánál egy bizonyos energiájú hullám szabadul fel, így nincs tipikus energia mennyisége. Éppen ezért ez a jelenség jól használható úgynevezett gamma spektrum készítéséhez. Ezen intenzitás – hullámhossz spektrum segítségével meg lehet állapítani a bomló anyag összetételét, mivel minden anyag egy jól meghatározott energiájú hullámot bocsát ki. A teljes spektrumot elemezve, megfigyelhetjük egy anyag bomlási termékeit, így azoknak forrására tudunk következtetni.

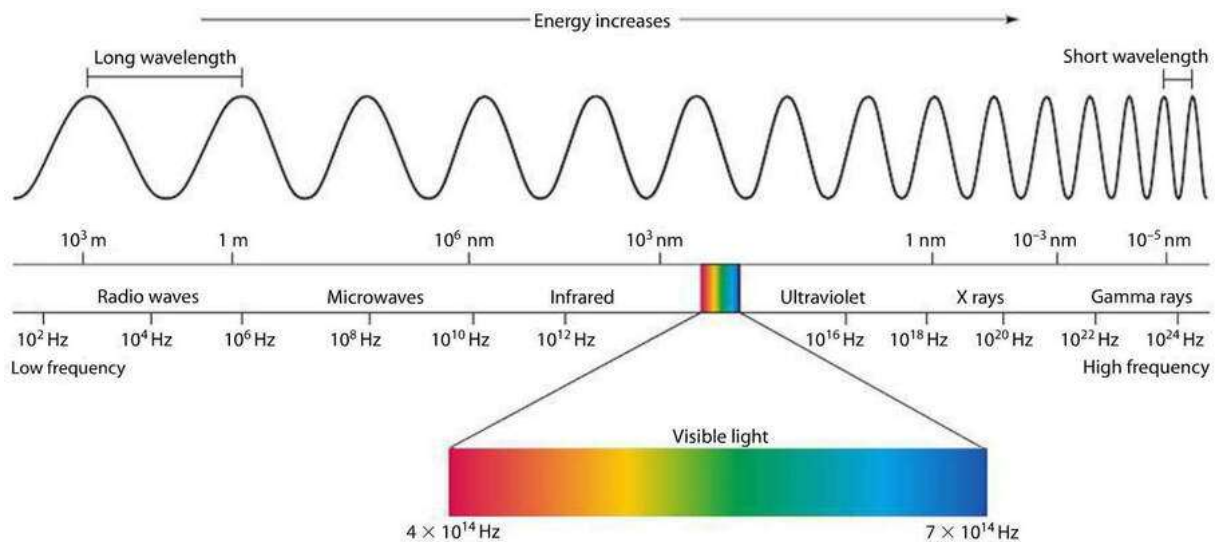
Amit az ionizáló elektromágneses sugárzásról tudni kell

A gamma sugárzás elektromágneses hullám révén, hasonlóképpen viselkedik, mint bármely más elektromágneses hullám. Ionizáló képességét pedig csupán csak energiájának nagyságából kapja. Mivel a fotonoknak nincs amplitúdója, ezért energiájuk csakis a hullámhossztól függ. Egy foton energiáját kiszámolhatjuk a következő képlet segítségével [3]:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

- E: A foton energiája [J]
- h: Planck állandó
- c: A fény sebessége [m/s]
- λ : A foton hullámhossza [m]

Ahhoz, hogy ionizálni tudjuk egy anyagot elektromágneses hullámokkal, vagy növelnünk kell a fotonok mennyiségét, vagy az egyes fotonok hullámhosszát csökkenteni kell. A teljes elektromágneses spektrum egyik „végén” a rádióhullámok helyezkednek el, a másik „végén” pedig a gamma fotonokhoz rendelhető hullám.



I. ábra, Az elektromágneses hullámok spektruma [4]

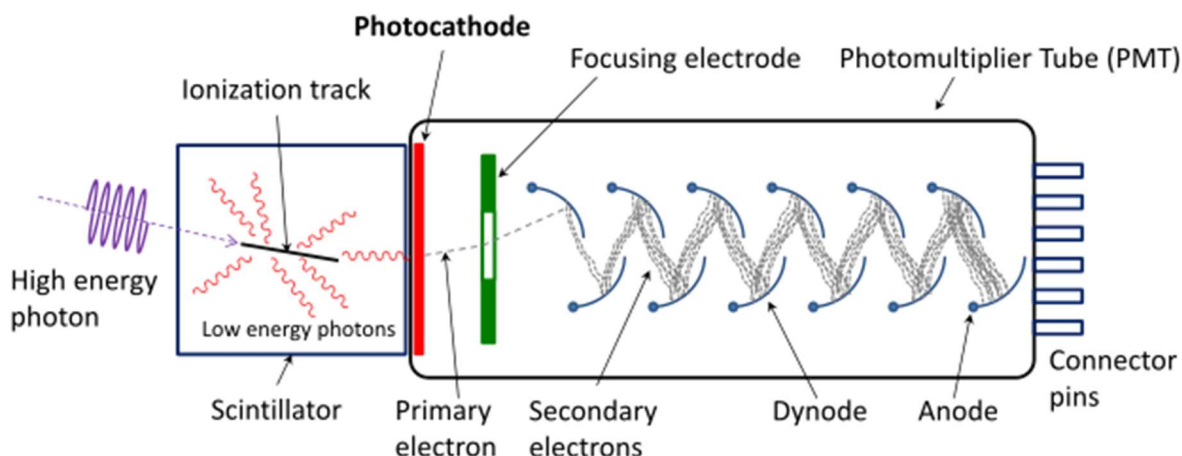
Az elektromágneses teljes spektrum mindkét „végén” létrejöhet ionizáló sugárzás. Nagyobb teljesítményű rádióadók képesek ionizálni a körülöttük lévő levegőt a kisugárzott több kilowattos teljesítményük révén, viszont, ha a spektrum rövid hullámhosszak felől eső oldalát nézzük, gamma sugárzást kibocsájtó bomlási folyamatok képesek megtenni ugyanezt pár atom bomlásával. Ebből is látszik a különböző hullámhosszú sugárzások energiáinak eltérése.

Az elektromágneses teljes spektrumban a gamma sugárzáson a röntgen sugárzásnál kisebb, tipikusan 30-35 pm-nél [5] rövidebb hullámhosszú sugárzást értjük. A fent említett energiára vonatkozó képlet segítségével a gamma foton energiáját kiszámolva minimum 3,5 keV-ot kapunk, tehát a későbbiekben a méréseink során készített gamma intenzitás – hullámhossz spektrumunknak ez lesz majd a mért minimuma (energiában).

Mások által készített műszerek

A gamma spektrométerek között számos olyan van, amelyeket nagy cégek készítettek másik nagy cégeknek, szervezeteknek, abból a célból, hogy pontos gamma sugárzás méréseket tudjanak készíteni. Ezeknek a műszereknek nagy szerepe van az anyagvizsgálatban, bányászatban, és a legkülönbébb kutatásokban. Éppen ezért, az egyes cégek által gyártott műszerek ára is pontosan ezt tükrözi. De az ár nem csak azért magas mert ez egy nagyon fontos műszer, hanem azért is, mert ezek e műszerek megbízhatóan biztosítanak bizonyos elvárt szintű pontosságot, így a felhasználó biztos lehet abban, hogy amit a műszer mutat, az pontos érték.

Az ilyen pontos mérésekhez ezek a műszerek valamilyen szcintillátor kristályt és egy úgynevezett fotontöbbszöröző vákuum csövet használnak. Érdekes talán megemlíteni, hogy az ilyen fajta mérőeszközök működésének elméleti alapjai rendkívül egyszerűek.



2. ábra, Foton többszöröző vákuum cső felépítésének ábrája, rajta az elnevezések angol neveivel [6]

A műszerbe belépő gamma foton először egy olyan szcintillációs kristályon halad keresztül, amely ennek hatására alacsonyabb energiájú fotonokat bocsát ki. Ilyen tulajdonságokkal rendelkező kristály például Tallium-Nátrium-Jód (későbbiekben: NaI(Tl)), Lantán-Bromid, vagy HP Germánium (későbbiekben: HPGe). A kristálytól függően a kibocsátott foton(ok) energia szórása lehet kisebb vagy nagyobb, ~10% NaI(Tl) [7] esetében, vagy ~0,5% HPGe esetében [7], de energia szórásuktól függetlenül, a szcintillátor kristályok mind meglehetősen drágák az egyszerű emberek számára, és az áruk csak felfele ível a pontosságuk függvényében.

Viszont nem csak a kristály szükséges a műszerhez, hanem egy a fotonokat felfogó részeszköz is. Ez az elem a profi műszerekben egy fotontöbbszöröző vákuum cső, vagy pontosabb nevén fotoelektron-sokszorozó vagy fotomultiplier, ami úgyszintén egy relatív drága eszköz. [6] Ebben a csőben egy sor elektromosan töltött kis méretű, de kissé homorúra hajlított fémlemezke van, amit, ha a kristályból kilépő fotonok eltalálnak, akkor az ütközésben elektronok szabadulnak fel. Ezt a jeleség a fényelektromos hatás, amelynek igazolásáért Albert Einstein a fizikai Nobel-díját kapta 1919-ben. Tehát a pontatlanabb nevével ellentétben a cső a felszabadult elektronokat többszörözi vagy sokszorozza meg, nem a fotonokat. A cső végén a felgyűlt elektronokat érzékeljük, így az egész felépítés erősítőként működik. Egy jól beállított műszer a bejövő foton mennyiséget lineárisan erősíti fel, így a mért értékek pontosan leolvashatóak.

A professzionális műszerek között csakis ilyen, vagy ehhez hasonló alapokon működő műszereket használnak, mivel nem nagyon van más olyan megoldás, amely hasonló pontosságra lenne képes [7].

A hobbi környezet ezekkel szemben más. Egy hobbi környezetben nem kell nagy pontosság, nem kell nagy megbízhatóság, inkább csak az számít, hogy „használható” legyen a műszer. Ebből kifolyólag a hobbiból ilyen műszert építők törekednek inkább az olcsó és egyszerű megoldásra.

A hobbi gammaspektrométerek között a profi műszerekhez legközelebbi műszer meglátásom szerint az ausztrál fejlesztésű Bee Research által készített Gamma Spectacular nevű eszköz.



3. ábra, A Gamma Spectacular és a Justin Atkin által készített mérő egység [8, 9]

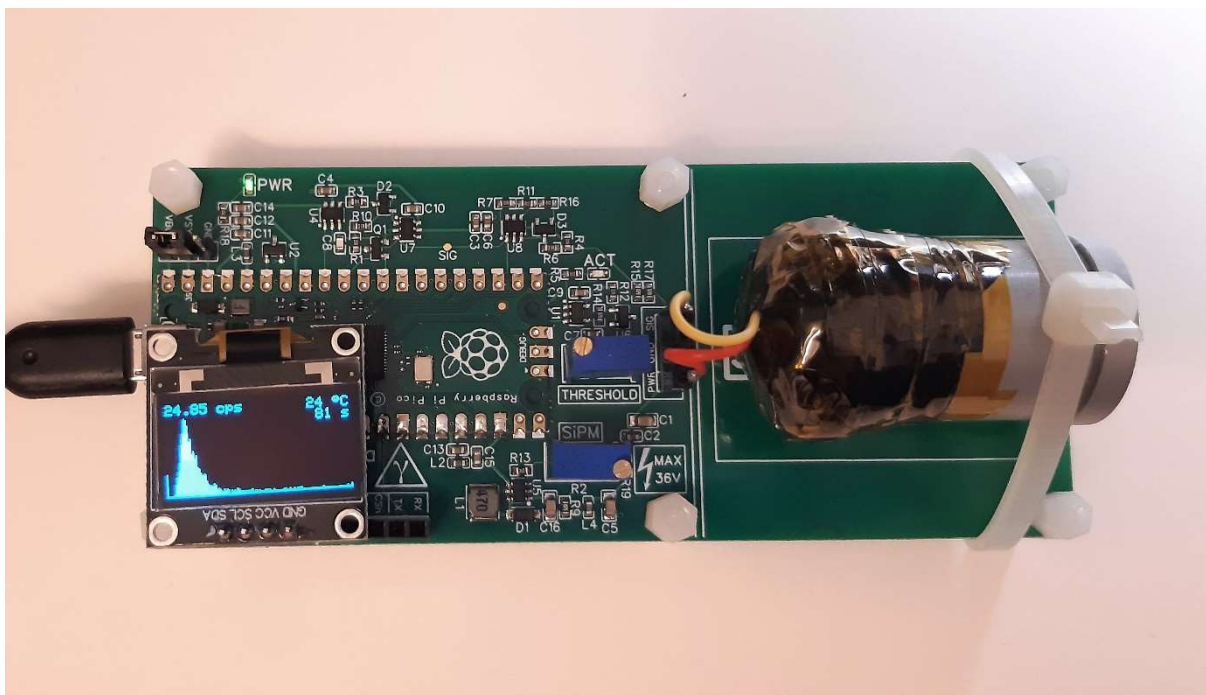
Ez az eszköz egy ADC, jelfeldolgozó és nagyfeszültségű tápegység egyben. Ez az eszköz a korábban említett elektrontöbbszöröző vákuum csöveket használja mérőeszközként, amelyet egy szcintillátor kristállyal párosítunk. Az eszköz szolgáltatja a cső működéséhez szükséges nagyfeszültséget, és a csőből jövő jeleket pedig felerősíti és megméri. A mért értékeket USB-n keresztül számítógép segítségével jelzi ki.

Ez az eszköz csakis az elektronikai része a gammaspektrométernek, ugyanis magát a mérőfejet a felhasználónak kell megépítenie. A felhasználó maga döntheti el, hogy milyen típusú érzékelőt használ, de a Gamma Spectacular elsősorban szcintillátor kristályos érzékelőhöz készült. Viszont ebben a termékben a profi eszközökkel szemben, maga a felhasználó válogathatja össze a szükséges alkatrészeket, így például használni tud pontatlanabb elektrontöbbszörözőt, vagy olcsóbb szcintillátort, úgy, mint például a Bicronból készült műanyag szcintillátorok.

Ezzel a saját készítésű érzékelővel tud az eszköz mérni, mégpedig úgy, hogy a mért jeltüskéket a számítógép által értelmezhető hanggá alakítja át. Ezt a hangot a számítógép feldolgozza, és kijelzi a Bee Research által készített saját fejlesztésű szoftverben. A szoftverrel végezhető el a kalibrálás, majd szimpla dózismérés vagy spektrum felvétele. Hasonlóan egy profi műszerhez.

Ám ez mind jól hangzik, de a vákuum cső nagyfeszültséget használ, legtöbbször 1 kV-os feszültséget igényel, ami közel sem biztonságos azok számára, akiknek nincs ilyen feszültség szintű munkavégzésben tapasztalata. Ezen felül maga az eszköz is nagy, és ezért kényelmetlen használni, a profi eszközökhöz képest.

Amennyiben hobbi célokra barátságosabb eszközt keresünk, akkor megismerkedhetünk az osztrák Mattias Rosezky által készített Open Gamma detektorral. Ez az eszköz továbbra is egy szcintillátor kristályos eszköz, de nem egészen úgy működik, mint a többi.



4. ábra, Open Gamma Detector - Mattias Rosezky gammaspektroszkópja [10]

Ez a műszer egy NaI(Tl) [10] kristályt használ érzékelőnek, aminek a kibocsátott fotonjait egy fényérzékeny diódával méri meg. A diódának a jeleit egy erősítő és jelszint tartó kapcsolás (peak-hold) segítségével méri meg egy RP2040-es mikrokontroller, a jeleket utána vagy számítógép dolgozza fel, vagy helyben a mikrokontroller végzi a jelfeldolgozást. A kalibrálást és a méréseket itt is egy, az eszközhöz írt számítógépes programmal lehet elvégezni. A mérés kényelme biztosított.

Ennek a műszernek sok előnye van a normál elektrontöbbszöröző csöves műszerekkel szemben. A kristály mérete kisebb, mivel nem kell lefednie egy nagy méretű vákuum csövet, az érzékelő dióda nem igényel nagyfeszültséget a működéshez, és méretében is jóval kisebb, mint egy elektrontöbbszörözős megoldás. A kapcsolás egyszerűen összeépíthető otthon is, vagy megvásárolható készen, tehát maga az eszköz könnyen elérhető. Open Source projekt révén még saját verziót is készíthetünk belőle. Ez az eszköz egy tökéletes hármas egyensúlyt testesít meg az ár, az egyszerűség és pontosság tekintetében.

Ám ha mindez még mindig túl drága lenne, a genfi egyetem diákjainak van egy még egyszerűbb és még olcsóbb műszere hasonló célokra.

Oliver Keller, Matthieu Benoit, Andreas Müller és Sascha Schmeling készítette el a CERN támogatásával az ehhez a dolgozathoz inspirációt adó gammaspektrométert.



5. ábra, CERN részecske detektor - Genfi egyetem [25]

Az általuk készített gammaspektrométer egy fotodiódákat használó erősítő kapcsolás. Az ionizáló sugárzás méréshez két pár BPW34-es fotodiódát használtak, amin keresztül a sugárzás áthaladva egy alacsony amplitúdójú feszültség tüskét generál. Ezt a feszültség tüskét egy műveleti erősítő erősíti fel, hogy megmérhető nagyságú legyen. Ám ellentétben az eddig bemutatott műszerekkel, itt nincs semmiféle feldolgozó egység vagy ahhoz hasonló a dobozban. A műszer egy közönséges számítógép mikrofon bemenetét használja, mint mérőeszköz. A mért jel hangfrekvenciás sávban van, és az erősítőnek köszönhetően elég erős ahhoz, hogy a számítógép mikrofon bemenete meg tudja mérni. Ezen felül például a Gamma Spectacularhoz készült mérő program is így elemzi az így mért jeleket.

A genfi diákok megépítettek egy olyan gammaspektrométert, amely nem csak jól használható, de a lehető legolcsóbb és legegyszerűbb megoldás szimpla gamma intenzitás – hullámhossz spektrum készítésére.

A későbbiekben a saját műszeremet majd ezen műszer alapjaira, és az ezzel végzett kutatásokra fogom alapozni, mivel ez az az egyszerűség, amire célkitűzésként is törekszem.

Ionizáló sugárzás mérésére használható anyagok

A korábbiakban megismerhettük, hogy a számunkra fontos karakterizálható gamma sugárzás ionizáló, nagy energiájú fotonokból áll. Ahogy a sugárzó részecske (vagy a hozzá rendelhető hullám) további részecskékkal ütközik (hullámokkal találkozik), a részecskéket ionizálhatja, azaz egy elektromosan vezető csatornát hoz létre a közegben. Ezen ionizált csatorna szigetelőkben is létre jöhet, tehát minden szigetelőanyag használható sugárzás mérésre.

Az ionizált csatorna vezetőképessége függ az ionizált anyagtól, és a sugárzás energiájától. Nagyobb vezetőképességet nagyobb energiájú sugárzással vagy alacsonyabb ionizációs energiájú anyaggal lehet elérni. Ahhoz, hogy a lehető legszélesebb spektrumot

tudjuk megmérni a lehető legpontosabban, olyan anyagot kell választanunk, amelynek ionizációs energiája a lehető legkisebb. Ezt az anyagot a periodikus rendszer segítségével találhatjuk meg:

	1A	2A											3A	4A	5A	6A	7A	8A
	(1)	(2)											(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
			3B	4B	5B	6B	7B	—	8B	—	1B	2B						
			(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)						
1	H 1312																	He 2372
2	Li 513	Be 899											B 801	C 1086	N 1402	O 1314	F 1681	Ne 2081
3	Na 496	Mg 738											Al 577	Si 786	P 1012	S 1000	Cl 1251	Ar 1520
4	K 419	Ca 590	Sc 631	Ti 658	V 650	Cr 653	Mn 717	Fe 759	Co 760	Ni 737	Cu 745	Zn 906	Ga 579	Ge 762	As 947	Se 941	Br 1140	Kr 1351
5	Rb 403	Sr 550	Y 616	Zr 660	Nb 664	Mo 685	Tc 702	Ru 711	Rh 720	Pd 805	Ag 731	Cd 868	In 558	Sn 709	Sb 834	Te 869	I 1008	Xe 1170
6	Cs 376	Ba 503	La 538	Hf 642	Ta 761	W 770	Re 760	Os 840	Ir 880	Pt 870	Au 890	Hg 1007	Tl 589	Pb 716	Bi 703	Po 812	At 930	Rn 1040
7	Fr 400	Ra 509	Ac 499	Rf 490	Db 640	Sg 730	Bh 660	Hs 750	Mt 840	Ds n.a.	Rg n.a.	Uub n.a.	—	Uuq n.a.	—	—	—	—
6				Ce 527	Pr 523	Nd 530	Pm 536	Sm 543	Eu 547	Gd 592	Tb 565	Dy 572	Ho 581	Er 589	Tm 597	Yb 603	Lu 524	
7				Th 587	Pa 568	U 584	Np 597	Pu 585	Am 578	Cm 581	Bk 601	Cf 608	Es 619	Fm 627	Md 635	No 642	Lr n.a.	

6. ábra, Anyagok első ionizációs energiája (kJ/mol) [11]

A periodikus rendszerben az anyagok ionizációs energiája balról jobbra és alulról felfelé növekszik a táblázatban. A táblázatból így kiolvashatjuk, hogy az ionizációhoz legnagyobb energiát igénylő anyag a Hélium és a legkisebb energiát igénylő anyag a cézium.

Az ionizációs energia olyan szempontból fontos számunkra, hogy minél kisebb ez a szám, annál nagyobb lesz a sugárzás hatására a közegben kialakuló ionizált csatornának a vezetőképessége. Mivel a mérések során elkerülhetetlen valamilyen mérési zaj, ezért azt szeretnénk, hogy a sugárzásból eredő jel a lehető legnagyobb legyen.

Olcsón elérhető Geiger-csőves gammaspektrométerek nemes gázzal töltött csöveket használnak, mint szigetelőt. Ezeknek az anyagoknak igen magas az ionizációs energiájuk, hélium esetében ez 2372 kJ/mol, ami 24,5 MeV/mol-nak felel meg. Emiatt a cső üzemeltetéséhez nagyfeszültség szükséges, és a detektált jel felbontása, mivel függ az ionizációs energiától, nem megfelelően nagy. Emiatt a spektrumon a zaj nagysága nagy lesz a detektált jelünkhöz képest.

Jelen esetben a célom egy olcsó és könnyen elérhető szigetelő anyag megtalálása, amelynek az ionizációs energiája a lehető legkisebb. Esetemben a fémek és nemfémek csoportját vizsgálom meg először, mivel ezeknek az anyagoknak van szigetelő tulajdonsága a

nemesgázokon kívül. Ezen áttekintett anyagok közül a legalacsonyabb ionizációs energiájú anyagok a szilícium, germánium és bór.

Elérhetőség és ár szempontjából a legmegfelelőbb választás a szilícium. Félvezetők formájában olcsón és nagy mennyiségben elérhető elektronikai boltokban, és ionizációs energiája háromszor alacsonyabb, mint a Geiger-féle csövekben használt héliumé, ami 8,1 MeV/mol.

Szilícium alapú sugárzás mérés

Most, hogy meg van a használni kívánt anyagom, a kérdés az, hogy milyen formában tudjuk beszerezni.

A sugárzásmérés alapja az ionizált csatorna vezetőképességének mérése. Ahhoz, hogy vezetőképességet pontosan tudjunk mérni, alapállapotban egy nagy elektromos ellenállás szükséges, hogy az alap és az ionizált állapot között a lehető legnagyobb eltérés legyen. Ezen felül nagy érzékelési felületre van szükség, hogy a véletlenszerű irányba haladó gamma fotonokat a lehető legnagyobb eséllyel tudja az eszköz érzékelni. [12]

Mindezeknek a követelményeknek megfelel egy PIN dióda. Ez a termék egyszerűen elérhető elektronikai boltokban, félvezetőként alapesetben szigetelőként viselkedik és méretében lényegesen nagyobb, mint más szilícium alapú alkatrész. [12]

Egy PIN diódának a felépítését az alábbi ábra jellemzi:



A „P” réteg a dióda anódját jelképezi. Ez a réteg bórral szennyezett szilícium, aminek köszönhetően az anyagban elektron hiány van jelen. Normál működés közben ebben a rétegben ez vezeti az áramot. [12]

Az „N” réteg a dióda katódját reprezentálja. Ez a réteg foszforral szennyezett szilícium, aminek köszönhetően az anyagban elektron többség lép fel. Normál működés közben ebben a rétegben a szabad elektronok vezetik az áramot. [12]

A két réteg között egy úgy nevezett kiürített réteg jön létre. A kiürített réteg a „P” és „N” réteg töltéskülönbségéből adódik. A két anyagi réteg határánál a szabad elektronok az elektronhiányos „P” rétegbe mozognak, és így egy erősen szigetelő réteg alakul ki. Amennyiben fordított (záró) irányban kötjük be a diódát, ez a réteg megnövekszik a nagyobb potenciál különbség miatt. [12]

Sugárzás méréséhez ezt a záró irányú szigetelő képességet használjuk ki. Abban az esetben, ha egy ionizáló részecske vagy a hozzá rendelt de Broglie-hullám halad át a kiürített rétegen, abban

egy ionizált vezető csatorna alakul ki. A kialakult csatornán át a diódára kapcsolt feszültség miatt áram fog folyni, aminek erősségét mérni tudjuk. És mivel az ionizált csatorna vezetőképessége attól függ, hogy mekkora az áthaladó sugárzás energiája, a mért áram nagysága egyenesen arányos lesz a részecske vagy a hozzá rendelt hullám energiájával. Amint tudjuk annak energiáját, meg tudjuk állapítani, hogy milyen fajta sugárzásról van szó, és meg tudjuk állapítani annak eredetét. [12]

Műszer követelmények

A fentiek és a célkitűzésben megfogalmazottak szerint a műszernek a következő követelményeket kell teljesítenie:

- A jövőbeli továbbfejlesztés szempontjából a műszer felépítésének és működésének olyannak kell lennie, hogy hordozhatóra lehessen átalakítani. Ebből következően az alapjáratú áramfelvételnek minimálisnak kell lennie, hogy akkumulátorról lehessen működtetni hosszú időn keresztül. Mindemellett az egész kapcsolásnak relatív kisméretűnek kell lennie.
- Az alacsony feszültségű mérések miatt a mérőfejnek és a jel erősítésére szolgáló áramkörnek egy elektromos zajoktól árnyékolt dobozban kell legyen. Ez biztosítja majd a külső elektromos zajoktól való árnyékolást.
- Az áramkör által keltett elektromos zajok ellen való védekezésre zajsűrő szükséges a mérőfej tápellátását biztosító bemeneten, valamint a jel erősítését végző áramkör tápellátásának bemenetén. Mivel a feldolgozó egység már a felerősített jelekkel dolgozik, ezért annak számára nem szükséges a zajsűrő beépítése.
- A megfelelő mennyiségű jel begyűjtése és a mérések meggyorsítása érdekében, a sugárzást érzékelő alkatrésznek a lehető legnagyobb felületűnek kell lennie. Ez maximalizálja az érzékelt sugárzás valószínűségét egy adott idő intervallumban.
- Az áramkörnek képesnek kell lennie mérni a fejből érkező jeleket. Ez azt jelenti, hogy az erősítő fokozatoknak és a „trigger” jelet előállító komparátornak képesnek kell lennie felerősítenie a bejövő 10-20 kHz frekvencia-tartományú jelet.
- A jeleket feldolgozó mikrokontroller mintavételezési sebessége a bejövő jel legmagasabb frekvencia-komponensének legalább a kétszerese kell legyen, a maximális érték megállapításához.
- A jeleket feldolgozó mikrokontrollernek képesnek kell legyen arra, hogy az adatokat helyben feldolgozza azért, hogy a jövőben hordozható eszközzé lehessen alakítani a teljes műszert. A feldolgozott jelekből származó eredményeket a mikrokontroller egy külső számítógép számára UART segítségével kell átadnia, a széles körű kompatibilitás miatt.

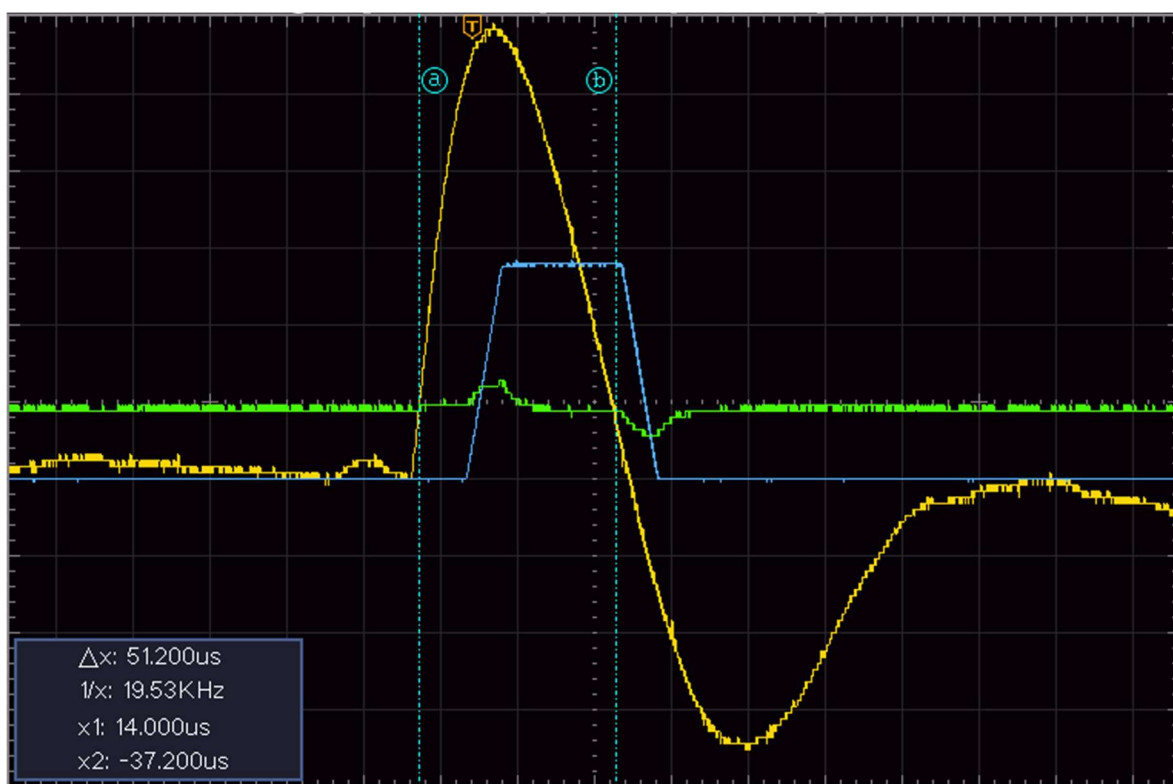
Alkatrészek választása

A műszer mikrokontrollere

A műszer legfontosabb eleme a mikrokontroller, amely fogadja a beérkező jeleket, feldolgozza az adatokat, és kommunikál a számítógéppel.

A mikrokontrollernek első sorban képesnek kell lennie nagyfelbontású analóg méréseket végeznie a jelek legmagasabb frekvencia-komponensének legalább kétszeresével. Kétszeres frekvencia a Nyquist mintavételezési törvény alapján szükséges. Ez a törvény kimondja, hogy bármely jel valós alakját fel lehet rajzolni, ha a jel legmagasabb frekvenciájú komponensének kétszeresével mintavételezzük azt.

Esetünkben a következő ábra (7. ábra) ábrázolja azt a tipikus bejövő jelet, amelyet a mikrokontrollernek mérnie kell. A zöld csík a komparálási jelet ábrázolja. Amint azt a fejből érkező jel átlépi, a komparátor kimenete 0-ból 1-be vált. A mikrokontrollernek ezekre a jelekre kell reagálnia. Mivel a mért jel (sárga) előzetes mérések alapján 10-20 kHz-es komponenst tartalmaz, mint legmagasabb frekvenciájú komponens, ezért a mintavételezési frekvenciának ehhez kell igazodnia.



7. ábra, A mikrokontrollerbe beérkező jelek – Oszilloszkópos mérés

A mért értékek alapján megállapított mintavételezési frekvencia minimum 40 kHz. Ilyen jelet képes mintavételezni az ESP32 mikrokontroller. Az ebben lévő ADC legmagasabb mintavételezési frekvenciája 200 ksp/s [13] 12 bites felbontásban, tehát jelen alkalmazásra teljes mértékben megfelelő.

Emellett, az ESP32 egy kétmagos mikrokontroller, tehát egyszerre két feladatot képes párhuzamosan kezelni. Ez a funkció lehetőség jelen esetben nem releváns, de pl. egy jövőbeli továbbfejlesztés szempontjából fontos lehet.

Mivel a bejövő jelek 0 és 3 volt között változnak, ezért figyelembe kell vennünk a mikrokontroller működési feszültségét is. A jeleket a beépített ADC csak 0V és a tápfeszültség

között tudja értelmezni. Ez az ESP32-es esetében 3,3 V. Mérés közben az ADC 12 bites felbontása 0 és 3,3V [13] között oszlik meg. Jelen esetben a maximális 3V bemeneti feszültség kellőképpen közel van a 3,3V-hoz, hogy elfogadhatóan nagy felbontással dolgozzunk.

A sugárzást mérő eszköz

A sugárzás mérésére szilícium alapú félvezetőt fogok használni. Ennek tulajdonsága, hogy alapesetben szigetelőként viselkedik, és csakis akkor válik vezetővé, ha az ionizáló sugárzás keresztülhalad az anyagon és ionizálja azt.

Mivel a sugárzás egyfajta véletlenszerű jelenség, így valószínűségi számítással írható le. Jelen esetben a detektor felület nagysága az, ami befolyásolja az érzékelt sugárzási jelenségek térbeli kiterjedését. Minél nagyobb a mérőegység felülete, annál nagyobb lehet az érzékelt jelenségek száma.

A detektor érzékeny felületének maximalizálásához fotodiódákat fogok használni. Előnyük, hogy olyan nagy, lapos szilícium darabokból álnak, amelyek vékony műanyag réteggel vannak bevonva. A nagy méret az előbbieken elmondottak alapján előnyös, továbbá a vékony műanyag réteg lehetővé teszi, hogy minden fajta sugárzás típusát megfigyeljünk. Alacsony tisztaságú alkatrészről lévén szó, az ilyen fotodiódáknak az ára is alacsony, ami miatt könnyen beszerezhetőek.

Ezeket a diódákat záró irányba kötve, csak akkor fogják vezetni az elektromos áramot, ha a dióda mindkét rétegén keresztül halad az ionizáló sugárzás. Ezt a fontos pillanatot fogjuk a későbbiekben mérni, detektálni.

A jelerősítő

A fotodiódából kijövő villamos jel nagysága igen kicsi. 9V-os előfeszítés esetén ez 10 mV_{pp} (milli volt csúcsról csúcsig) körül van. Ahhoz, hogy ezt a jelet kellő pontossággal meg tudjuk mérni, fel kell erősítenünk.

Az erősítés esetemben egy kétlépcsős, közös emitteres tranzisztoros erősítő kapcsolással jön létre. Ehhez a kapcsoláshoz két NPN tranzisztort fogok használni. Az első egy alacsony erősítésű áramgenerátoros kapcsolás, amely alacsony zajjal a kívánt jelet annyira erősíti csak fel, hogy azt a következő fokozat a kellő feszültség korlátok közé tudja erősíteni.

A választott NPN tranzisztor a KST5089-es tranzisztor. Ennek a tranzisztornak kimagaslóan nagy erősítése van, bétája 450-500 [14]. Ezt a nagy erősítési faktort mindössze 2dB-es zaj kimenettel [14] tudja teljesíteni, ami az esetemben igen fontos az alacsony feszültségű jel erősítéséhez.

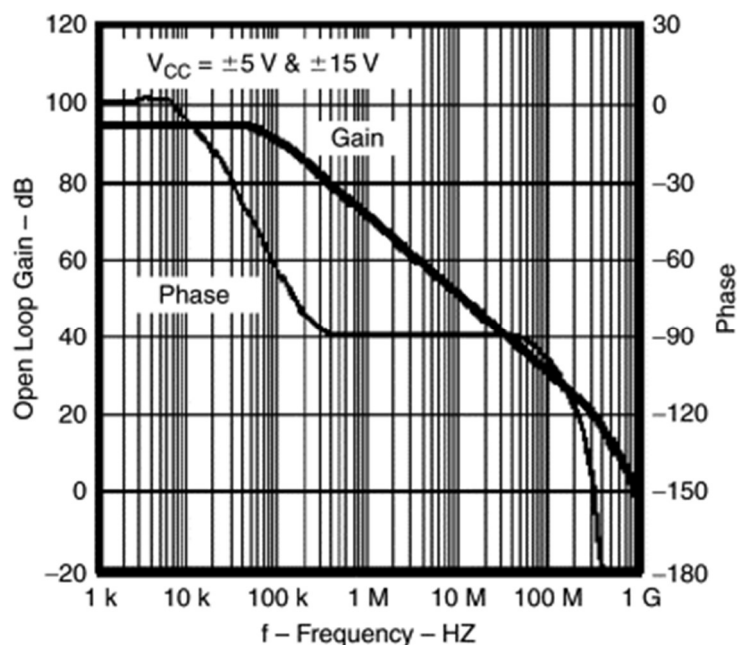
Minél alacsonyabb az erősítő által generált/erősített zaj szintje, annál alacsonyabbra fogom tudni állítani majd a komparálási feszültséget, így várhatóan valamely nagyon kis energiájú sugárzást is detektálni leszek képes.

Komparátor és trigger jel

A komparátor kapcsolás a jelfeldolgozás egy alapvető része. Amikor az erősítóből a mérendő jel megérkezik, a komparátor kapcsolás az, ami eldönti, mikor mérjen a mikrokontroller, mivel a lehető leggyorsabb mintavételezéshez a mikrokontrollernek a teljes ciklusát a bejövő jel mérésére kell fordítania. Amikor egy jel beérkezik a komparátorba, a komparátor egy referencia feszültséghez hasonlítja azt, és amint a jel feszültség szintje átlépi a referencia feszültséget, a komparátor jelez a mikrokontrollernek. Ez a jel egy megszakítást eredményez a mintavételezésben, aminek következtében az addigi pontig rögzített jelszintek kiértékelésre kerülnek.

Ahhoz, hogy pontos időben történjen ez a megszakítás, egy gyors, de azért nem túl gyors reagálású komparátorra van szükségünk. Mivel a maximális mintavételezési frekvencia 20kHz, ezért egy olyan komparátor IC-re lesz szükségünk, ami ezen a sávon felül nem működik jól. Ez megakadályozza a nagyfrekvenciás zavarok bekerülését a mérési folyamatba.

Az LM358 egy audio műveleti erősítő. Nyílt hurkú erősítésének letörési frekvenciája 40 kHz és 50 kHz között van [15]. Így, a mikrokontrollernek csak akkor fog jelezni, ha a kívánt jel frekvenciájához hasonló jel érkezik. Ez megfelelő a mérést befolyásoló zavarok részleges kiszűrésére.



8. ábra, LM358 kimeneti frekvencia függése – TI adatlap [15]

A műszer felépítése

A műszer felépítése lebontható funkcionális elemeire:

- Tápellátás
 - Feszültség szintekre osztás
 - Diódák villamos megtáplálása és zajsűrés
 - Zajsűrés
- Dióda sor
- Erősítő fokozatok
 - Előerősítő
 - Csatolás a kapcsolás többi részéhez
- Komparáló kapcsolás
- Csatlakozás a mikrokontrollerhez
- Mikrokontroller és jelfeldolgozó

Tápellátás

A műszerben több különböző feszültség szint van jelen. Minden részen a feszültség szintek olyan feszültség értékre vannak beállítva, hogy az a lehető elfogadható legnagyobb legyen.

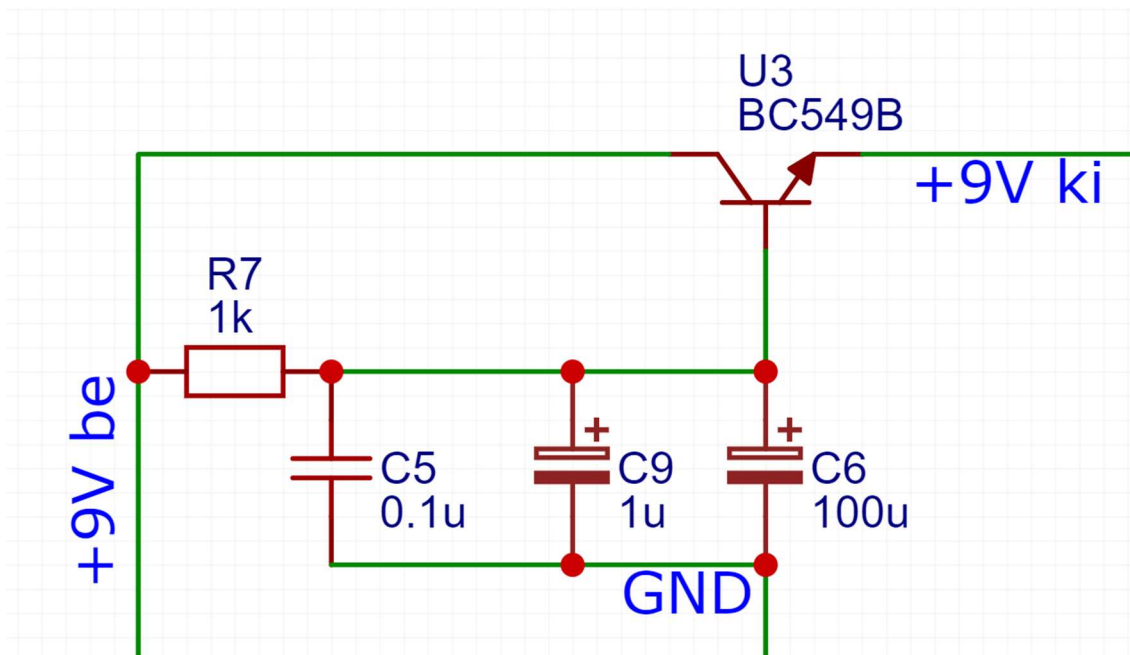
A dióda sor és az erősítő fokozat 9V-os feszültséget kap. Mivel a választott BPW-34-es diódának a záró irányú letörési feszültsége 10V, ezért a maximális biztonságos feszültség, amit rákapcsolhatunk ebben a konfigurációban az 9V. Ezzel a megoldással a kijövő villamos jel értéke a lehető legnagyobb lesz, mialatt még biztonságos feszültség szintet kap a dióda. Abban az esetben, ha a dióda letörési feszültségét meghaladjuk, a dióda kinyit és a diódán keresztül káros nagyságú áram fog folyni.

A dióda sor és az erősítő fokozat számára a 9V-os feszültséget egy külső kapcsoló üzemű tápegység fogja biztosítani. Alternatívaként egy 9V-os elemet is használhatunk, mivel a kapcsolás áramfelvétele <1.5 mA, ezért egy elem hosszú ideig lenne képes táplálni a kapcsolást elhanyagolható feszültség szint-csökkenés mellett. Asztali teszteléshez, azonban külső tápot fogok használni. Ennél a megoldásnál a dióda sor stabil feszültségének biztosításához egy úgy nevezett kapacitás többszöröző szűrő kapcsolást fogok használni.

Működésének alapja, hogy egy tranzisztor bázisára zajmentes feszültséget kapcsolunk egy RC szűrőn keresztül, így a tranzisztor követi a szűrt, zaj nélküli feszültséget. Ezzel a megoldással a tranzisztoron keresztül folyik a terhelő áram, míg az RC szűrő biztosítja a zavar szűrést. Ennek a kapcsolásnak a határ frekvenciáját az alábbi RC szűrő RC képlet adja meg [16]:

$$f_h = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

- f_h : Határfrekvencia [Hz]
- R : Ohmikus ellenállás [Ω]
- C : Eredő kapacitás [F]



9. ábra, 9V-os zaj szűrő áramkör rész - kapacitás többszöröző kapcsolás

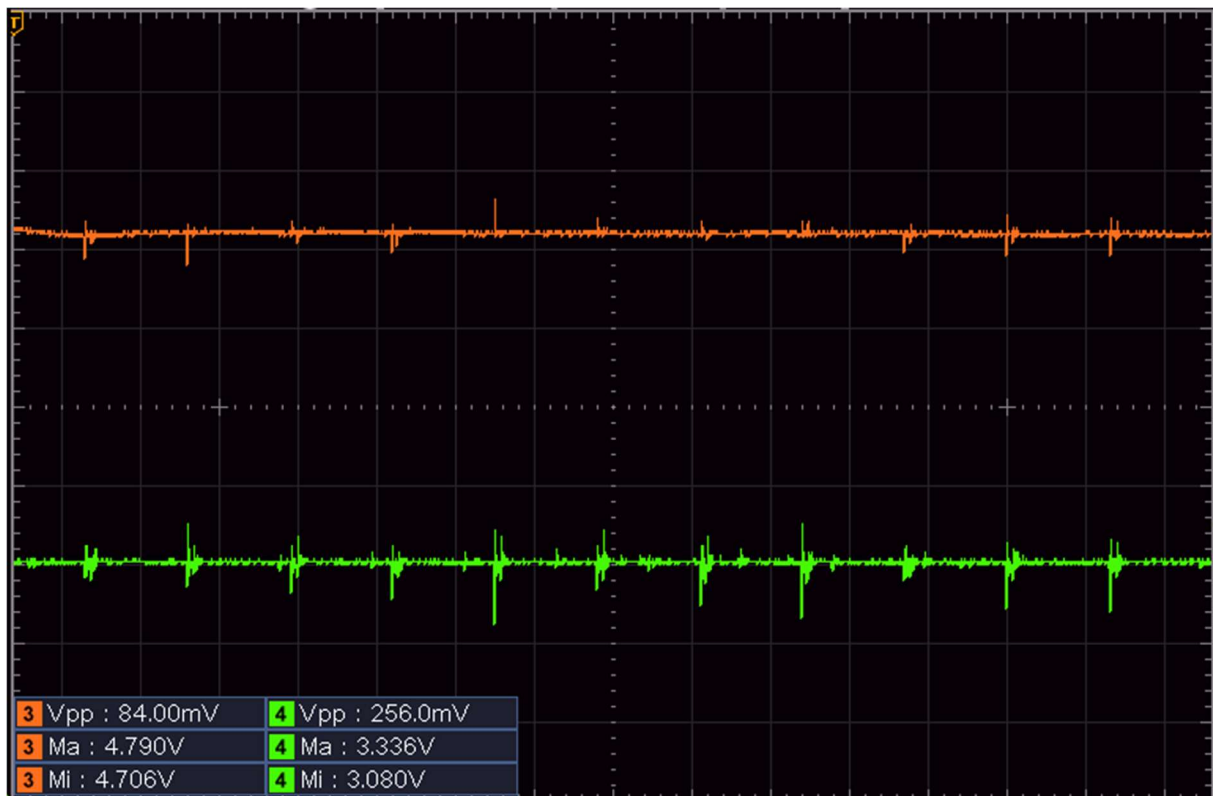
Ez alapján a képlet alapján a jelen szűrő kapcsolás felső határfrekvenciája 1,57 Hz, tehát minden a tápegység felől jövő zavaró frekvenciát kiküszöböl az erősítő és a diódasor kapcsolásból. A szűrő kapcsolás kimenetét mérve a kimeneti feszültség csúctól csúcsig tartó feszültsége 4 mV. Ez egy stabil, zavarmentes tápfeszültség.

A mikrokontrollernek szükséges 3,3 V-os feszültséget egy a mikrokontrollerbe épített LDO feszültségszabályzó szolgáltatja. Mivel a mikrokontroller számítógéphez kötve dolgozik, ezért USB csatlakozóján keresztül folyamatos 5V-os feszültséget kap. Az USB 5V-os feszültségből állítja elő a feszültségszabályzó a szükséges 3,3 V-ot.

Az USB 5V-os feszültségét használja a komparáló kapcsolás is. Az ESP32 „Vin” kivezetésén USB megáplálás esetén 5V-os feszültség szint jelenik meg, amelyet használhatunk ez esetben a további áramkörök táplálására.

Az USB feszültséget legtöbb számítógép kapcsolóüzemű tápegység segítségével állítja elő. Ezeknek a mellékhatása a lehetséges zaj faktor. A jelek zajtartalmának csökkentésére szűrőkondenzátorokat alkalmazunk mind a 3,3 V-os és 5 V-os részekben. Ezek alkalmazásával a feszültség hullámlás, az az a feszültségek csúctól csúcsig tartó feszültségértéke megfelelően alacsony. Lásd az alábbi 10. ábrát!

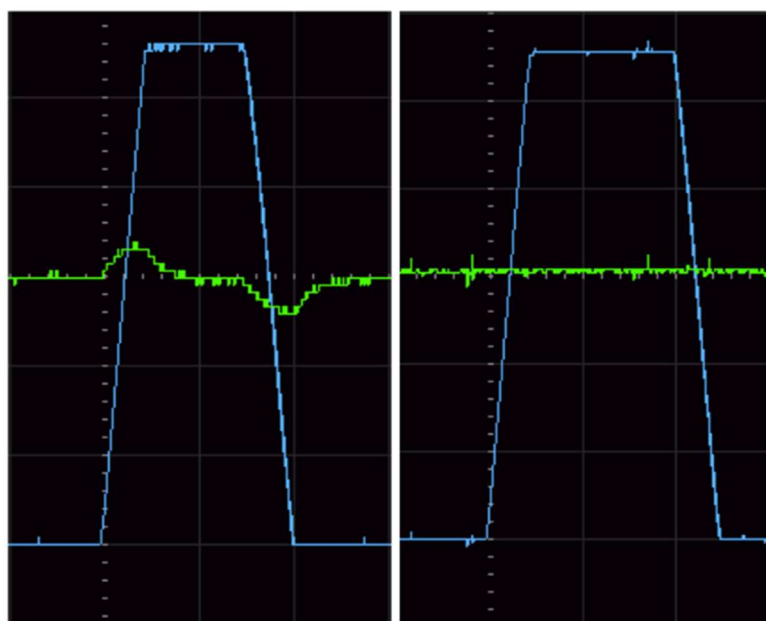
Esetünkben a kondenzátorok a diagramon látható mértékig csökkentették a táp kapcsolási zaját. 5V-os tápbemenet esetén 84 mV és 3,3 V-os táp esetén 256 mV. A 3,3 V-os táp esetében a látható zaj a mikrokontroller referencia feszültségét esetlegesen befolyásolhatja, de mivel ezeknek frekvenciája jóval magasabb, mint a mérendő jel frekvenciája, ezért hatásuk elhanyagolható.



10. ábra, A tápfeszültség zajtartalma - oszcilloszkópos mérés

A komparáló kapcsoláshoz tartozik a komparálási feszültséget előállító potenciométer is. Ennek a potenciométernek az állása úgy van beállítva, hogy az erősítóből kijövő zaj szintje fölött legyen a szint, éppen a maximum zaj szinthez lehető legközelebb esve.

Mivel a komparátor befolyásolja áram felvételével a potenciométeren beállított referencia feszültséget, ezért szükségem van egy stabilizáló kondenzátorra párhuzamosan kapcsolva a potenciométer kimenetével. Ez a kondenzátor a potenciométerrel egy RC frekvencia szűrőt képez, ami működés közben kiszűri a komparátor által keltett zajokat.

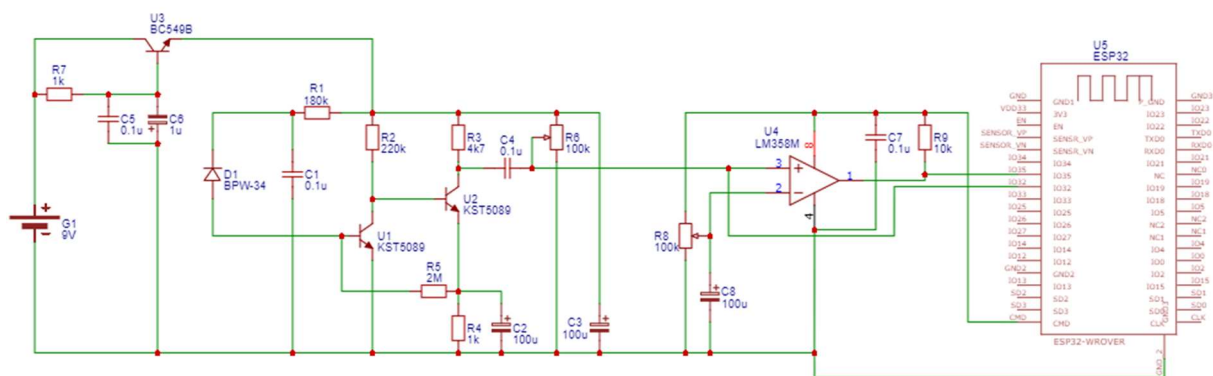


11. ábra, komparátor befolyása a referencia feszültségre kondenzátor nélkül és kondenzátorral - Oszcilloszkópos mérés

A 11. ábrán a bal oldalon idő függvényében a kondenzátor nélküli potenciométer kimeneti feszültség jele látható, a jobb oldal pedig a stabilizált kimenetet mutatja. A komparátor kimenetének átváltásánál (kék színű jel a 11. ábrán) a referencia feszültség (zöld színű jel) meging. Ha gyorsan egymás után érkező jeleket szeretnénk mérni, akkor ez a referencia megingása a komparátor 0-ból 1-be váltásánál visszaváltást eredményezhet. Ez a visszaváltás a mikrokontroller programjánál okozhat feldolgozási problémát.

A műszer kapcsolása

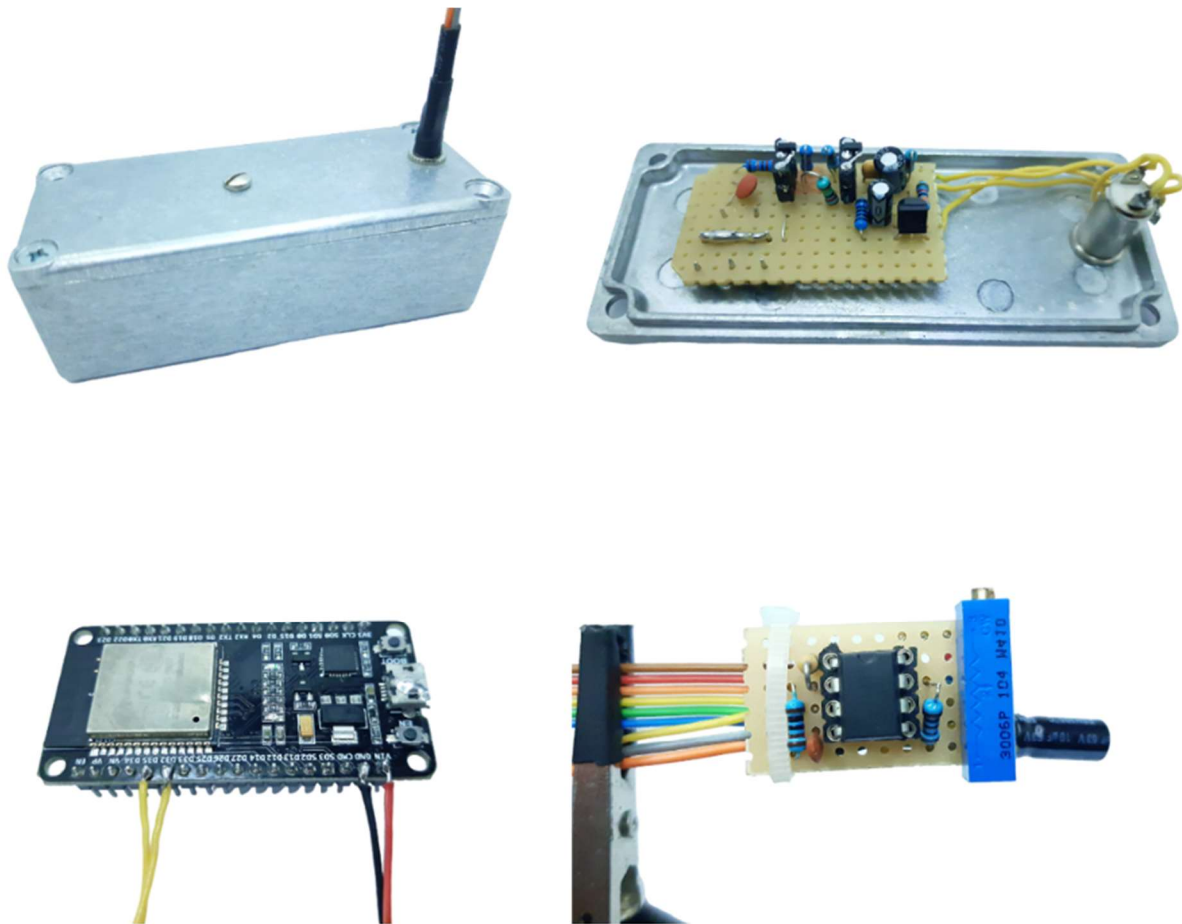
Az előző részben bemutatott részegységek az alábbi módon kapcsolódnak össze bonyolultabb áramkörre.



12. ábra, A műszer alap kapcsolása a követelmények alapján

Az egyes alkatrészeket lyukacsos próbapanelre forrasztottam fel, majd az egyes részeket kábelek és csatlakozók segítségével összekötöttem. A fotodiódák és az erősítő fokozat egy aluminium dobozban kapnak helyet, ahol a Faraday-kalitka elv szerint elektromos zavaroktól árnyékoltak, így minimalizálva a mérési zajt az elrendezésben. Az aluminium dobozba a 9V-os tápot csatlakoztatjuk bele, valamint az árnyékoló doboz kimeneteként magát a felerősített jelet kapjuk. A kimenet egy 3.5 mm-es jack-típusú csatlakozón keresztül csatlakozik a komparáló kapcsoláshoz az egyszerű csatlakoztatás érdekében.

A komparáló kapcsolás egy külön lemezen került megvalósításra, más szóval az egyes részegységekből ide érkeznek be a kapcsolatot felépítő kábelek. Ez a panel osztja szét a feszültséget az egyes elemek között, ebből származik a komparáló jel, és ezen keresztül megy a mérő részből érkező analóg jel a mikrokontroller felé. A kábelek ehez a részhez egy 2,5 mm-es tűskesoron keresztül csatlakoznak. A csatlakozók és pár tíz centiméternyi hosszúságú kábelek magát a fejlesztést és a méréseket segítik elő, mérési pontosság szempontjából nem előnyös e vezetékek használata. Mégis használatuk nem okoz említésre méltó mennyiségű zajt.



13. ábra, A megépített mérőműszer részei

A műszer szoftvere

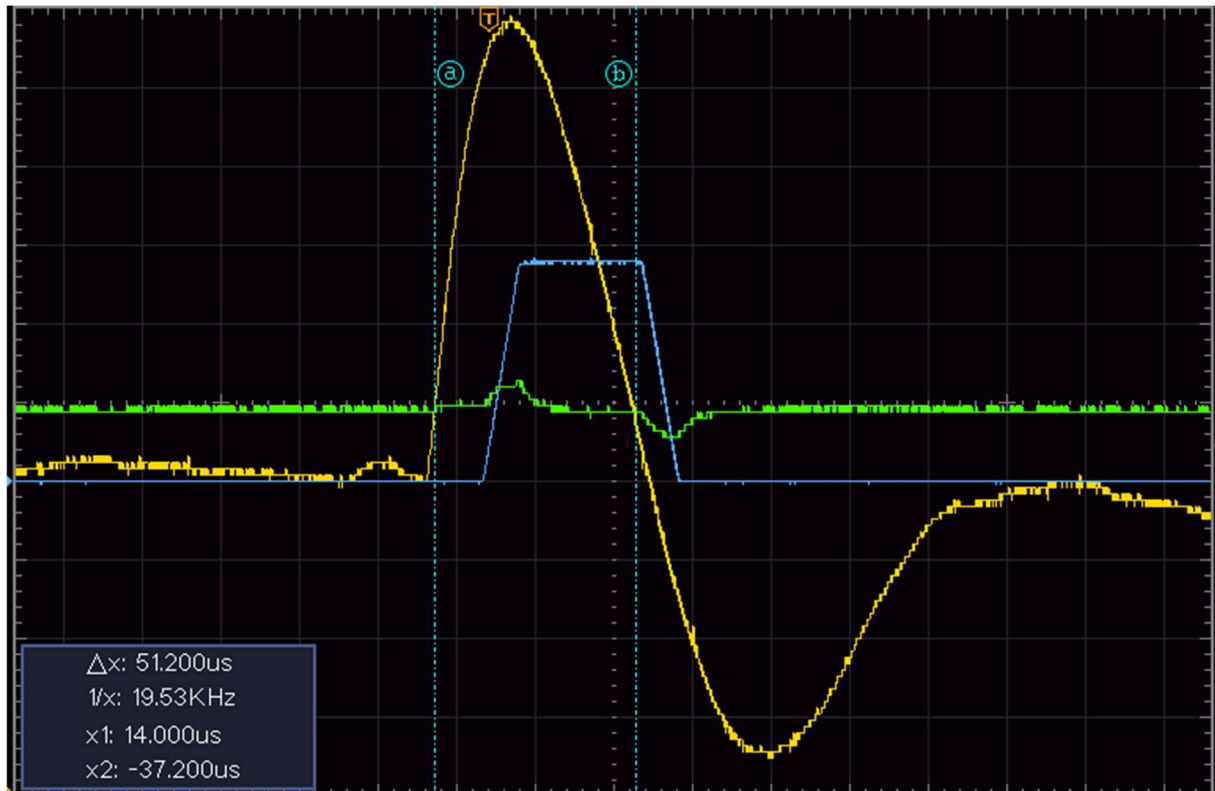
A műszer feldolgozó egysége egy ESP32 fejlesztői eszköz. Ezt az Arduino IDE szoftver segítségével tudjuk programozni.

A műszer szoftverének két fő funkciója van. Regisztrálja a bejövő jeleket és eltárolja azt, valamint, hogy a beérkezett jeleket feldolgozza és azt egy spektrummal alakítsa, amit majd később ki lehet jelezni. Ezeknek megfelelően az alábbi funkciókat fogjuk a programban megvalósítani:

- A mérő részből kijövő analóg jel folyamatos mintavételezése
- A komparátor kimenetének figyelése
- Idő intervallumban rögzített minták mentése a komparátor jelének megfelelően
- A mért értékek konvertálása egységes intervallumok közé
- Az egységes intervallumú értékek kijelzése Serial Plotter segítségével

Ahogy a korábbiakban látható volt a kapcsolási rajzon is, a mikrokontrollerbe két bemenet érkezik. A D35-ös bemeneten a „trigger” jel jön be, és a D32-es bemeneten pedig a fejből érkező analóg jel jelenik meg.

A bejövő jeleket ez az ábra mutatja:



14. ábra, A mikrokontroller által feldolgozandó jelek - Oszilloszkópos mérés

Az ábrán a sárga jel az erősítő részből jövő analóg jel, a kék pedig a komparátorból jövő „trigger” jel. A trigger jel alap esetben logikai „0” szinten van, ezzel jelzi a normál állapotot. Amikor a mérőfejen sugárzás halad át és a fej jelének szintje meghaladja a korábban beállított szintet (zöld vonal), akkor a jel 3,3V-ra megy fel.

Az ESP32 maximális mintavételezési sebessége 200ksps abban az esetben, ha 120MHz-es óra jelet használunk, tehát a mintavételezési sebesség megfelelően gyors a kapott, esetünkben ~20kHz-es jelünkhöz.

A programkódot az Arduino IDE fejlesztő környezet segítségével Arduino C nyelven fogom megírni.

A mintavételezéshez az ESP32 beépített I2S ADC funkcióját fogom használni. Ennek az előnye, hogy az ADC a beolvasott értékeket egyből memóriába rakja, így felgyorsítva a mintavételezést. Viszont, mivel jelen esetünkben nem kell a lehető legmagasabb frekvenciájú mintavételezés, ezért a minta vételezésünket a következő képpen fogjuk beállítani:

```
>> I2S.begin(ADC_DAC_MODE, 640000, 16);
```

Ezzel a paranccsal az ADC1 átalakító 1-es portjának 1-es bemenetét ADC-DAC módra állítottuk és mintavételezési frekvenciáját 640.000 bit per másodpercre állítottuk. Mindezt 16 bites mért és 12 bites transzformált felbontással, tehát 137ksps mellett 1mV-os pontossággal fogunk mérni. Ez a pontosság ezen felül még változhat a referencia feszültség függvényében.

A mintavételezés végrehajtásához szükségem lesz egy „integer” (egész szám) típusú tömbre, amely segítségével eltárolom az adatokat. Ennek a tömbnek olyan nagyságúnak kell lennie, amilyen mennyiségű adatot a konzol programunk egyszerre ki tud jelezni. Mivel mi az általam használni kívánt Arduino IDE Serial Plotter funkciója csak 500db adatpontot tud kijelezni egyidejűleg, ezért a feldolgozott adatok darabszáma 500db lesz. Ezt a tömböt „values” néven fogom tárolni.

A mintavételezés végrehajtására a program ismétlődő részében kerül sor. Itt minden egyes mintavételezési körnél a tömbbe másoljuk az aktuális értékeket. Ez biztosítja majd azt, hogy bármikor történik a jel beolvasás, az mindig egyenlő időtartamra van az előző méréstől. Ehhez a mintavételezést a következő képen hajtjuk végre:

```
>> void loop() {  
>>   for(int i = 0; i < 500; i++) {  
>>     values[i] = I2S.read();  
>>   }  
>> }
```

Minden egyes körben 500 mérést végzünk, és mindig a sorban legelsőnek mért értéket írjuk át. Ezzel azt érjük el, hogy a tömb mindig a legutolsó 500db mért adatpontot tartalmazza. Az adatok feldolgozása során így a lehető legnagyobb megszakítatlan intervallum áll rendelkezésünkre, és egy bejövő jel esetén így tudjuk a legpontosabban meghatározni a jel spektrum mérése szempontjából fontos csúcsertékét.

A következő fontos rész a bejövő jelek feldolgozása. Ezt akkor tesszük meg, ami után a bejövő jel már véget ért és minden visszatért alaphelyzetbe. Ezt a komparátor jelzi azzal, hogy a kimeneti feszültség szint 0V-ra esik vissza.

Az ESP32 esetében ezt egyszerűen érzékelhetjük. Egy megszakítás funkciót kell megvalósítanunk, amely egy előre megadott állapot esetén végrehajt egy műveletsort. Ezt a funkciót „Interrupt” funkciónak nevezzük.

A megszakító funkciónak az alábbi paramétereket kell adnunk:

- A bemenet címe, amelyen a megszakítás jele fog érkezni
- A megszakítást előidéző állapot változás típusa
- A változás bekövetkeztekor meghívandó utasítás sorozat kezdeti helyének neve

Ezeknek megfelelően a megszakítást az alábbi paranccsal tudom beállítani:

```
>>attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(35), click, FALLING);
```

Ezt használva a megszakító bemenetünk a GPIO35-ös bemenet lesz. A megszakítást a nullára vissza eső jelváltozás fogja előidézni, és megszakítás esetén a „click” nevű utasítás sorozatot fogjuk végrehajtani.

Ez az utasítás sorozat fogja feldolgozni a jelet tartalmazó tömb értékeit, majd eltárolja azt a spektrum rajzoláshoz szükséges tömbben.

A jel feldolgozása során meg kell keresnem a jel maximumát, majd ezt a maximum értéket el kell helyeznünk egy 0-tól 500-ig terjedő skálán. Ennek a skálának a mérete szintén a megjelenítő program képességeitől függ, amely esetben továbbra is 500 adatpont.

A használt skálánk lineáris, tehát a mért értéket lineáris függvény segítségével kell átalakítanunk. Egy ilyen funkció az arduino.h alap könyvtár beépített funkciója a „map” parancs:

```
>> map(Xbe, BEa, BEf, KIa, KIf);
```

Ez a parancs az alábbi képlet alapján működik:

$$X_{ki} = \frac{(X_{be} - BE_a) \cdot (KI_f - KI_a)}{(BE_f - BE_a)} + KI_a$$

- X_{ki} : Kimeneti érték, amelyet egy másik tartományra szeretnénk áttranszformálni.
- X_{be} : Bemeneti érték, melyet át akarunk alakítani
- BE_a : Bemeneti érték minimum lehetséges értéke
- BE_f : Bemenet maximum lehetséges értéke
- KI_a : Kimenet minimum kívánt értéke
- KI_f : Kimenet maximális kívánt értéke

A bemeneti skála az erősítő fokozat kimeneti egyenáramú komponensének értéke lesz, hiszen a jeltűskék ezen felüliek, maximális érték pedig az ADC által mért maximális értéke, a tápfeszültség értéke lesz, azaz 4095. Ezt a tartományt szeretnénk transzformálni a kijelző program skálájára, 0 és 500 közé.

Ha megkaptuk a transzformált értéket, akkor azt a már létrehozott, spektrumot tároló tömbbe rakom bele. Minden egyes értéknek 0-tól 500-ig egy számlálót tartunk fenn ebben a tömbben, és amikor egy értéket rakunk be, akkor ahhoz az értékhez tartozó számláló értéket tároljuk el. Így ahogy bejönnek az értékek azonnal láthatjuk a spektrum alakulását. Valamint a kijelző program dinamikusan tudja változtatni a spektrum függőleges (sűrűség) skáláját.

Ezzel együtt a jelet feldolgozó rész csupán ennyiből áll:

```
>> value = map(Signal, 2730, 4095, 0, 499)
>> spectrum[value] += 1;
>> clickAlert();
```

A bejövő jel értékét a spektrum skálájára transzformálom, a transzformált értéket a „spectrum” nevű tömbbe feljegyzem, majd hangjelzést adok, a felhasználónak a beérkezett jelről.

Számítógép felé UART csatlakozást használ az eszköz. Ennek segítségével bármely ilyen célra szánt konzol programmal ki tudom jelezni a mért és feldolgozott adatokat. Az UART csatlakozáshoz a következő paramétert használjuk:

```
>> Serial.begin(115200);
```

Ezzel a paranccsal a kommunikáció sebességét 115200Bps-ra állítjuk, ami széleskörben elterjedt a modern eszközök körében. Így USB csatlakozón keresztül egyszerűen tudjuk átvinni az adatokat számítógépre minden bejövő jel feldolgozása után.

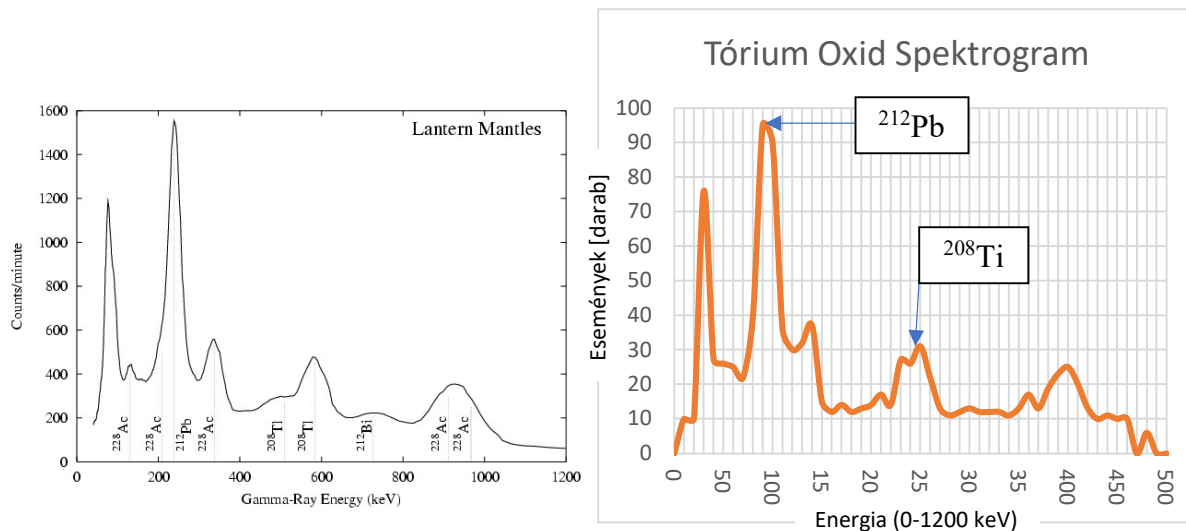
A műszer kalibrálása

A műszer kalibrálását egy ismert forrással tudom elvégezni. Amennyiben ismerjük a sugárzó anyagot, amit mérni próbálunk, akkor a mért értékeket úgy tudjuk utólag korrigálni, hogy a várt spektrumot kapjuk. Ezt a korrekciós értéket az összes értékre használhatom majd a jövőben, mivel a beérkező sugárzás energiája és a mért jelek nagysága között lineáris összefüggés van. Ebből következően később használni tudom más anyagok mérésénél is ezt a korrekciós számot, és pontos spektrumot tudok rajzolni annak segítségével.

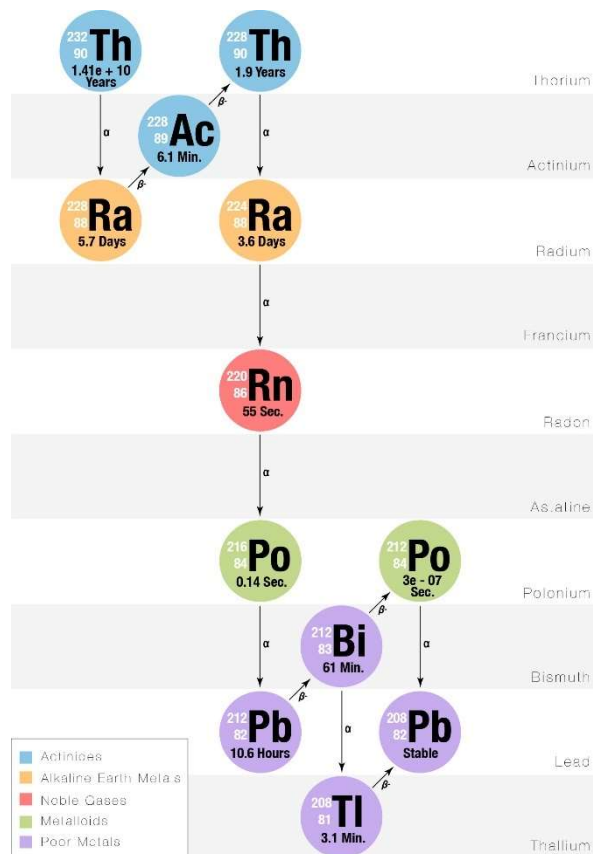
A műszer kalibrálásához egy könnyen beszerezhető, és már korábban mások által megmért anyagot szeretnék használni. Ilyen anyag a tórium oxid. A tórium oxid egy enyhén sugárzó fehéres színű anyag. Gáz lámpákban elterjedt adalék anyag, mivel magas hőfokra hevítve erős fehér fénnel izzik.

A kalibráláshoz tórium oxiddal átitatott lámpa szövetet fogok használni, mivel olcsó, könnyen beszerezhető, és relatív sok tórium oxidot tartalmaz. Az ebből származó sugárzást mérve spektrumot fogok rajzolni a kalibráláshoz.

A kalibrálást az adott anyag bomlási láncában található anyagok alapján végzem. Ebben az esetben a legnagyobb számban jelen lévő anyag a ^{212}Pb , ezért ez a legpontosabban kivethető. Első lépésben ennek az anyagnak a helyét fogjuk igazítani a spektrumon.



15. ábra, Tórium oxidos szövet mások által mért és a saját műszer által mért spektruma (a spektrum releváns része) [17]



16. ábra, Tórium bomlási sora [26]

A kalibrációs mérést 8 órán keresztül végzem. Ez alatt az idő alatt összegyűjtött értékeket dolgozom fel. A kalibrálást a tórium bomlási lánc alapján végzem el, és az itt megjelenő anyagokat keresem a spektrumon. Mivel tudjuk, hogy a bomlási lánc egyik anyaga, a ²¹²Pb domináns energiája 238keV [18], ezért a mért skálán az itt megjelenő legnagyobb tüske tekinthető 238keV-nak. Ahhoz, hogy a skála léptéket megállapíthassam, egy második tüskének a helyét is meg kell állapítani. Ehhez a ²⁰⁸Tl anyag energiáját vesszük alapul. Ennek a két tüskének a helyéből már tudom pontosan a skála korrekcióját, valamint a skála léptéket. A további mérésekhez ezek az adatok elegendőek, hogy pontos spektrumot készítek.

Kvarkok a kozmikus sugárzásban [19]

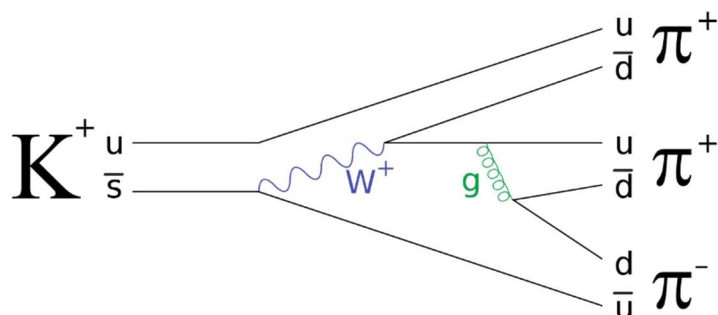
Nyugalmi állapotban az anyagokban legtöbb esetben csak háromfajta részecskével találkozunk. U-kvark, D-kvark és elektronok. Az alap részecskék ezekből állnak össze.

Proton esetében két U és egy D-kvarkból áll a részecske, neutron esetében pedig két D és egy U-kvarkból. A jólismert periodikus rendszer elemeinek tulajdonságait az ezekből a kvarkokból és elektronból álló kombinációk határozzák meg.

A kozmikus sugárzás többnyire neutronokból és alfa részecskékből áll, tehát a nagy része U és D kvarkokból áll. Ezeknek a részecskéknek az energiája egy széles intervallumba esik, 10^9 és 10^{20} eV körül. Ezt a hatalmas nagy energiát a csillagokból nyerik ezek a részecskék. Amikor a kozmikus sugárzás egy részecskéje ütközik a föld atmoszférájában lévő részecskékkel, az ütközésnél felszabaduló energiának köszönhetően felbomlik a hármas kvark csoportok közötti kapcsolatot. Ez a folyamat a hadronizáció. A hadronizáció alatt nem csak a kvark kötések felbomlása történik, hanem a már felbomlott egyedül álló kvarkok energiájukból újabb kvarkokat hozhatnak létre, majd ahhoz kötődnek.

Ezen folyamatok során első sorban kaonok jönnek létre. A kaon egy U és egy S-kvarkból állnak. Egy kaonnak hozzávetőlegesen 100 GeV energiája van, de ez függ a kaon fajtájától és annak sebességétől.

Mivel a kaonok nem stabil részecskék, ezért egy alacsonyabb, stabil állapot elérésére törekszenek.

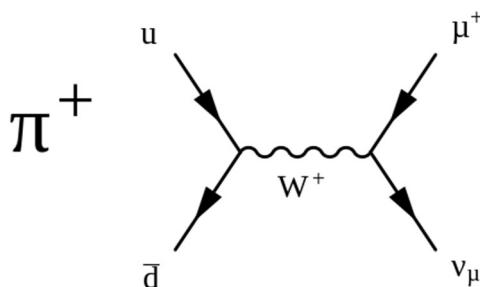


17. ábra, A kaonok bomlási lánc [20]

A kaon egyik alkotó eleme az S-kvark, amely hasonló tulajdonságú, mint a D-kvark, viszont jóval nagyobb tömegű, ezért nagyobb energiával rendelkezik, aminek hatására több D vagy U kvarká bomolhat le. Emiatt a kaonok bomlásuk folyamán kettő vagy több pionná alakulnak át, ami egy U és egy D-kvark kombinációját jelenti. Ezek a pionok lesznek a későbbiekben a müonok keletkezéséért felelős részecskék.

Müonok keletkezése [19]

A hadronizáció során létrejövő pionok az atmoszféra sűrűbb része felé haladva tovább bomlanak, és 15000m [21] magasság környékén a pionokból létrejönnek a müonok weak-bosons interakció segítségével.



18. ábra, A pionok bomlási láncja [22]

A müonok alacsonyabb energiájú részecskék, hosszabb bomlási idővel, mint a korábbi kvarkok, bomlási ideje, $2,2\mu\text{s}$ [21]. Sebességük a fény 99,4-99,8%-a [21] tehát ez alatt a $2,2\mu\text{s}$ alatt 600-650m [21] távot tesznek meg mielőtt tovább bomlanak. Ez a táv viszont nem az általunk látható megtett táv. A $2,2\mu\text{s}$ bomlási idő csak a müonok vonatkoztatási rendszerében igaz. A mi viszonyítási rendszerünkben nézve ez valójában sokkal hosszabb, amit majd az elkövetkezendő kísérletek során látni fogunk. Így a viszonyítási rendszerek közötti idő eltérésekből adódóan a keletkezett müonok 5-20%-a [21] éri el a Földfelszínt.

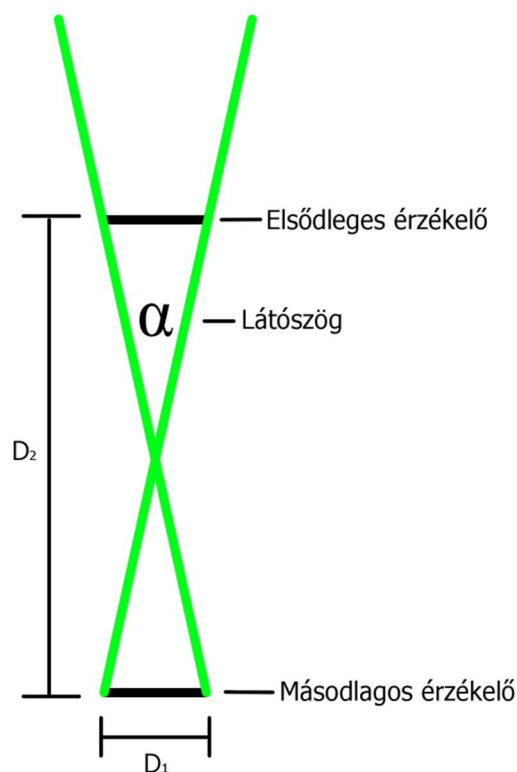
Müonok detektálásának folyamata

A müonok érzékeléséhez két dolgot kell ismernünk. A sugárzás irányát, és a sugárzás energiáját. Az irányból be tudjuk azonosítani, hogy amit mérünk az valóban az űr irányából érkezik, az energia meg majd beazonosítja a részecske típusát.

A mérés felépítése

A sugárzás irányának méréséhez egy olyan érzékelő elhelyezés szükséges, amely csak akkor jelez áthaladó sugárzást, ha az az érzékelővel megegyező irányban halad. Ahhoz, hogy pontos irányt lehessen mérni, az érzékelő apertúrájának (látószögének) keskenynek kell lennie. A későbbiekben irány méréseimhez 10 fokos felbontást szeretnék használni, tehát a műszer apertúrájának ezt a szöget választottam.

Mivel nincs olyan anyag, ami teljesen blokkolni tudja a müonokat, ezért az érzékelő felépítésénél nem lehet árnyékolást használni az apertúra beállításához. Árnyékolás helyett két érzékelőt használok. A két érzékelőt egymással párhuzamosan, egy bizonyos távolságra egymástól elhelyezem. A két érzékelő egymásra vetített felülete és azoknak távolsága fogja megadni az érzékelő látószögét, és ennek segítségével lehet majd megállapítani a sugárzás irányát.



19. ábra, A műszer apertúrájának számítása

Az érzékelő apertúráját az alábbi képlettel lehet kiszámolni:

$$\alpha = 2 \cdot \arctan \left(\frac{D_1}{D_2} \right)$$

Ahol α az érzékelő apertúrája fokban, D_1 az egyes érzékelők átmérője és D_2 a köztük lévő távolság.

A távolság megválasztásánál fontos figyelembe venni a kívánt érzékelő méretet. A nagyobb érzékelő méret több jelet fog eredményezni, ami felgyorsítja a mérést viszont nagyobb érzékelő mérettel az egyes érzékelők közötti távolságnak nagyobb kell lennie ugyan azon adott apertúrához.

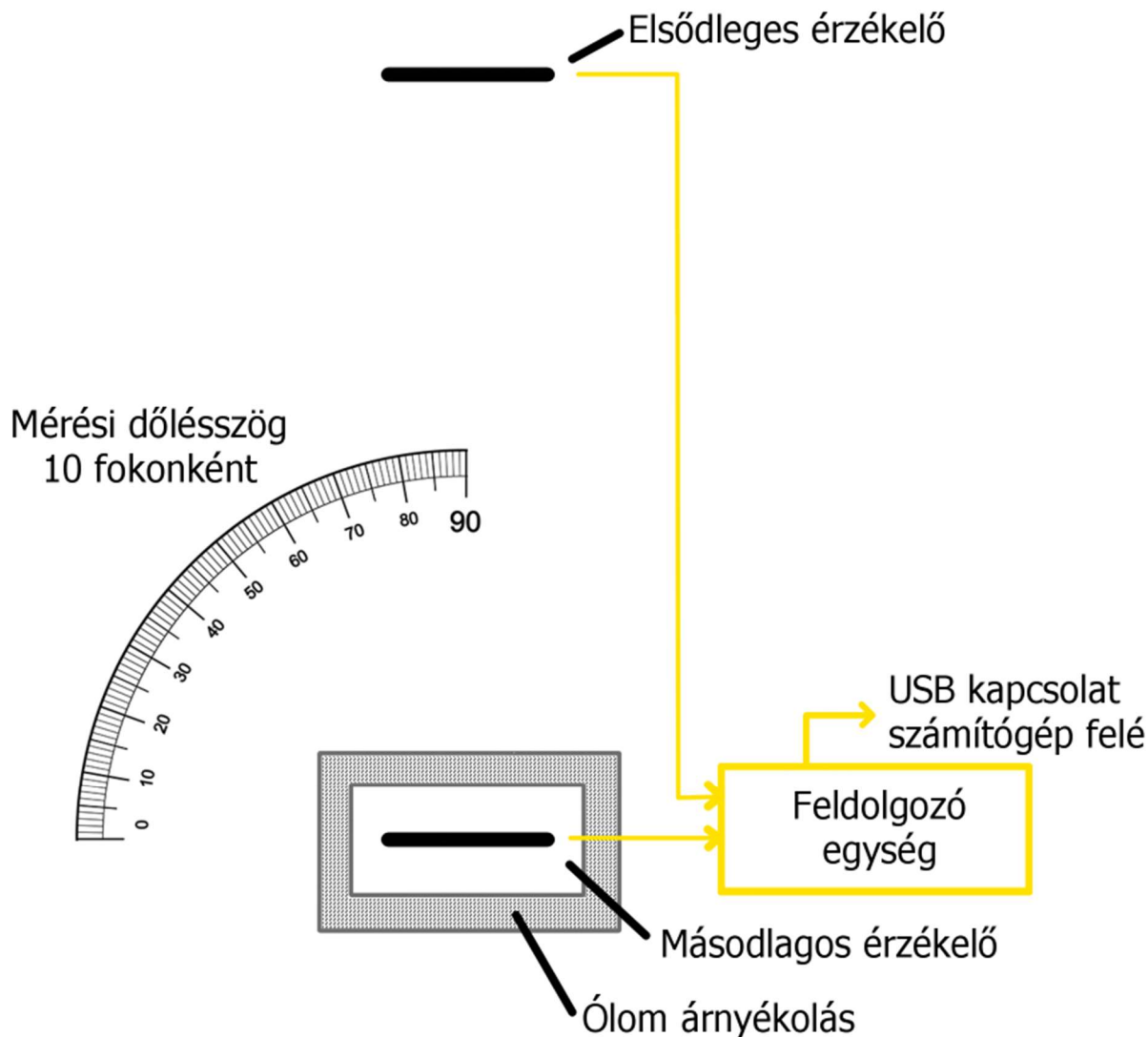
Esetemben az érzékelők átmérője 2,5cm, tehát egy tíz fokos apertúrához az érzékelők szükséges távolsága 28cm.

A jelen felépítést használva a rendszer csakis mind a két érzékelőn áthaladó sugárzást fogja érzékelni.

Mivel a kozmikus sugárzás a normál háttér sugárzásnál jóval nagyobb energiájú, ezért a spektrumnak azon részét, amely a müonoknál alacsonyabb energiájú, ki lehet szűrni a szoftverben. Ehhez a kalibrálási spektrumot fogom használni, és minden olyan jelet, amely kisebb, mint a felső 20%, azt figyelmen kívül hagyjuk. De ezen felül, fizikai árnyékolásra lesz szükségünk a zaj további csökkentéséhez. A fizikai árnyékoláshoz ólom lemezeket fogok használni. A másodlagos érzékelőt minden oldalon 5cm vastagon ólom lemezekkel fedem le. Ezek az ólom lemezek a természetes háttérsugárzás nagyrésztét megállítják, viszont a mérni

kívánt nagy energiájú müonokat nem befolyásolja lényegesen. Ezzel a kétfajta szűrési móddal a zaj kellően alacsonyra csökkenthető a méréseinkhez.

Mindezeket bemutatva, a mérés az alábbi ábra szerinti felépítést alkalmazza:



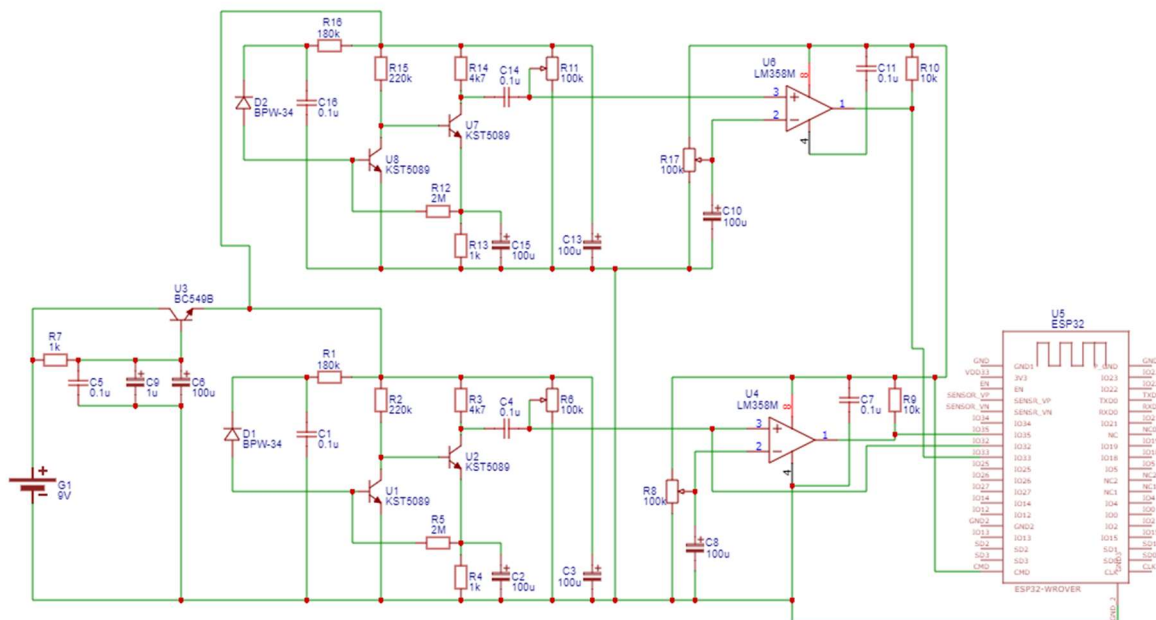
20. ábra, Müonok mérésének felépítése/elrendezése

A méréshez a műszer kapcsolását is módosítani kell. A műszer eddig csak egy darab érzékelővel rendelkezett, így a jelenlegivel párhuzamosan még egyet kötünk az irány mérésének céljából. Az egyes részek tápellátása a már meglévő részekből származik, így a kimeneti feszültségek ugyanakkorák lesznek mind a két esetben.

A második érzékelő kimenetét az LM358 második komparátorába vezetem. Ennek a komparátornak a kimenetét az ESP32 egyik bemenetéhez csatlakozom, amin keresztül majd érzékelni tudja majd az áthaladó sugárzást. A második érzékelő esetén viszont főleg az analóg jelet is a mikrokontrollerbe kötni, mert jelen kísérletben csak áthaladó részecskék darabszámát mérjük, és nincs szükség két külön ponton mérni azok energiáit. Mindössze azt

kell figyelembe venni, hogy az az érzékelő, amelynek az analóg jelét mérjük, azt burkoljuk be az ólommal.

A bővített műszer, ezek alapján a következő kapcsolás szerint épül fel:



21. ábra, Irányméréshez használt műszer kapcsolása

A kapcsolás módosításán kívül, a vezérlő programját is módosítani kell. A programba egy extra feltételt kell beiktatni. Amint a mikrokontroller érzékeli, hogy az egyik komparátor kimenete 0-ból 1-re váltott, meg kell vizsgálnia, hogy a másik komparátor kimenete is ugyanezt tette-e. Amennyiben mind a két komparátor kimenete áthaladást jelzett, a mikrokontroller feljegyzi a jeltüske maximális értékét, és abban az esetben, ha megfelelően nagy energiájú volt az áthaladás, a tüskét regisztrálja.

A mérés folyamata

A mérés célja a sugárzás forrásának fő irányának mérése. Az áthaladó sugárzás mennyiségének feljegyzésével és a mért irányok segítségével karakterizálni tudjuk a kozmikus sugárzás erősségét az irány függvényében.

Ehhez a méréshez a korábbiakban leírt kétérzékelős spektrométerre lesz szükség, amelyet állítható szögekben fogok felállítani.

A műszer két érzékelőjét a korábban meghatározott távolságra állítom le egymástól. Az összeszerelt műszert egy állvány segítségével megtámasztom a méréshez kívánt szögben.

A mérés során az egyes irányokból érkező sugárzás mennyiségét úgy állapítom meg, hogy a műszer vízszintessel bezárt dőlésszögét változtatom 10 fokonként. Függőleges iránytól indulva 90 fok dőlésig mérek, minden 10 fokonként 5óra hosszan keresztül. Az öt óra alatt a

műszer összeszámolja azokat az áthaladásokat, amelyek mind a két érzékelőn áthaladtak és megfelelően nagy energiájú volt. Minden mérés végén ezt a számot leolvasva feljegyzem azt.

A mérések szempontjából még fontos, hogy milyen napszakban végezzük a mérést. Nappal, a Nap közelsége miatt jelentős mennyiségű extra kozmikus sugárzás éri a földet. Ez a sugárzás a nap folyamán idővel változik, ezért az adott napszak szerint eltorzíthatja a mérést. Annak érdekében, hogy ne történjen ilyen, a méréseket éjszaka, naplemente után kezdem meg. Ezáltal a Napból érkező sugárzást leárnyékolja a Föld, és minden mérés során csakis a változatlan kozmikus sugárzást tudjuk mérni.

A kozmikus sugárzásból származó müonok mennyiségét nem ismerjük, viszont mivel a müonok bomlásának egyik fő okozója az atmoszférában található részecskékkel való ütközésük, ezért következtethetünk arra, hogy a keletkezett müonok közül mennyi fog eljutni a felszínig. Ezt a következtetést az atmoszférában megtett út alapján tudjuk megtenni. Ez alapján a következő képlettel tudjuk leírni a müonok szög szerinti eloszlását [19]:

$$\frac{n(\alpha)}{n(0)} = A^{\frac{1}{\cos(\alpha)} - 1} \cdot \cos^2(\alpha)$$

- $\frac{n(\alpha)}{n(0)}$: A dőlésszögre vonatkoztatott arány
- A : A távot megtevő müonok aránya
- α : Dőlésszög a függőlegesthez képest [fok]

A képlet a Földet körül velő atmoszférának alakját figyelembe vevő képlet. Jelen esetben „A” jelöli a függőleges távot megtevő müonok arányát. Ez függőleges esetben 1-nek vesszük. Az atmoszférában megtett távot figyelembe véve ez A^k , ahol „k” megmondja, hogy a függőleges helyzetben megtett úthoz képest mennyivel hosszabb a müon útja. Végül ezt megszorozzuk a müonok α szög szerinti eloszlásával, ami $\cos^2(\alpha)$.

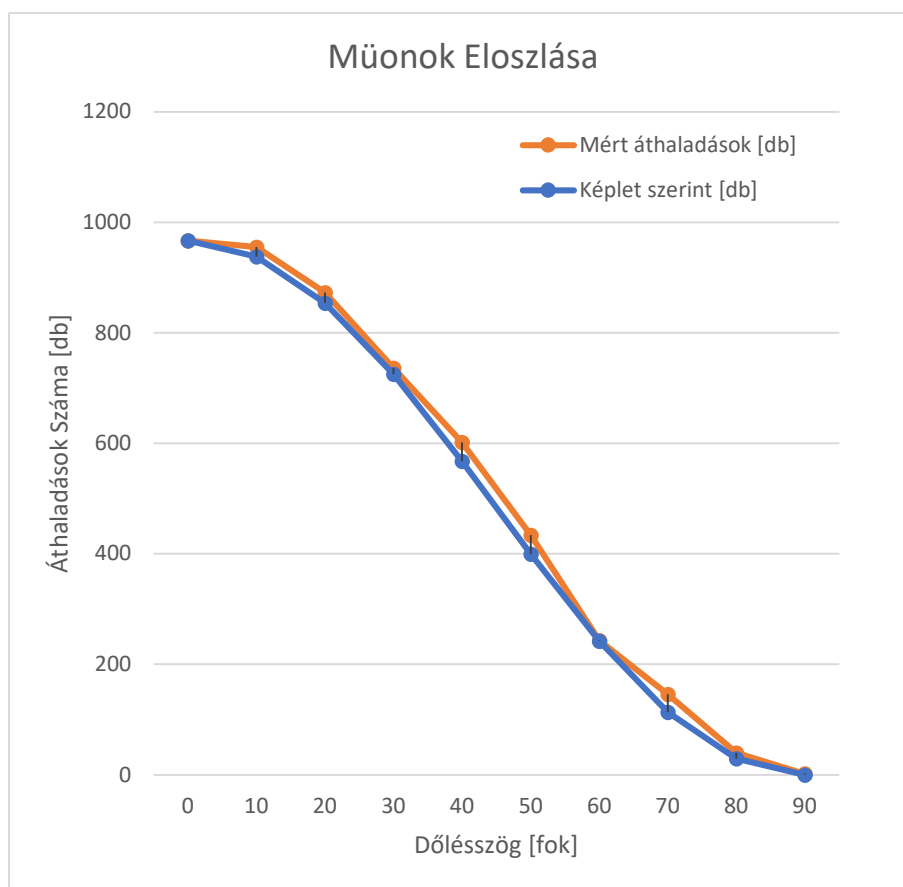
Mindezekből egy arányszámot kapunk, amit, ha megszorozunk a kezdeti müonok számával, akkor megkapjuk, hogy hány müon ér el a felszínig.

Hasonlóképpen, ha ezzel a számmal megszorozzuk a függőleges irányban mért müonok számát, akkor megkapjuk a többi szögnél ideális esetben mérhető müonok számát

A méréseket követően a feljegyzett értékeket táblázatba foglalom.

Dőlés [fok]	Mért áthaladások [db]	Képlet szerint [db]
0	967	967
10	955	938
20	873	854
30	736	725
40	602	567
50	434	400
60	243	242
70	146	113
80	40	29
90	2	0

A mért értékek alapján látható, hogy a szögtől függ a mért müonok száma, és az elméleti értékek, közelítenek a gyakorlatban megfigyelttekhez.



22. ábra, Müonok sűrűsége dőlésszög függvényében - saját műszeres mérés / képlet alapú diagram

A 22-es ábrán megfigyelhetők olyan pontok is, ahol a mért értékek majdnem pontosan egyenlők az ideális eloszlással, holott máskor nagyobbak annál. Ezek a mérések, habár mindegyike naplemente után készült, nem mindegyik ugyan abban az időben. Ebből kifolyólag a Nap által keltett további sugárzás, habár minimálisan is, de befolyásolta a mérést.

A relativitáselmélet alátámasztása, a müonok bomlásának mérése

A kozmikus sugárzásból származó müonok segítségével sok mindet meg lehet állapítani. A végső célunk a speciális relativitáselmélet, idődilatációs elméletének bemutatása.

Ezen elmélet alapján két különböző vonatkoztatási rendszer között eltérés léphet fel ez idő látszólagos múlásában. A mozgásban lévő vonatkoztatási rendszerben múltó idő külső szemlélő számára lassabban telik.

A relativitáselmélet alapján fennálló idő különbséget a következő képlet írja le [23]:

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t_0$$

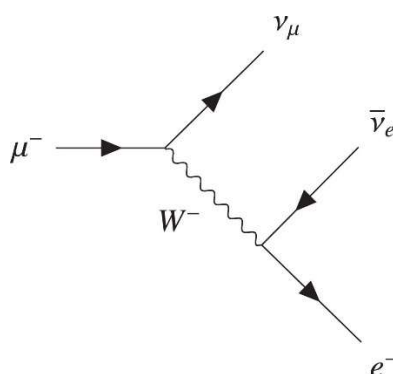
- Δt : A nyugalomban lévő vonatkoztatási rendszerben eltelt idő [s]
- Δt_0 : A mozgásban lévő vonatkoztatási rendszerben eltelt idő [s]
- v : A két megfigyelő egymáshoz viszonyított sebessége [m/s]
- c : A fény sebessége [m/s]

Az idő dilataciót gamma spektrométerrel nem lehet pontosan megmérni, de méréseink alapján tudunk következtetni annak létezésére.

A dolgozatban leírt már korábban elvégzett kísérleteimmel már megmértem a kozmikus sugárzásból származó részecskéket, és bebizonyítottam, hogy amit mértünk, annak eredete kozmikus. Az idődilatació szemléltetéséhez, viszont pontosan be kell azonosítani a mért részecskék típusát. A típus meghatározása után meg tudjuk mondani, hogy mennyivel tért el a becsült bomlási idő és a részecske vonatkoztatási rendszerében eltelt bomlási idő.

Esetünkben egy müonnak a bomlási folyamatát szeretnénk megmérni.

Egy müonnak a Feynman diagramja a következő képen néz ki:



23. ábra, Müonok bomlási diagramja [24]

A müonok lebomlanak müon-neutrínóvá, és weak-bosons interakcióval elektron-neutrínókká, valamint elektronokká.

Ezt a bomlási folyamatot mérni tudjuk, ha a müon a két érzékelő közötti távolságon áthaladva bomlik le. Ez a bomlási folyamat nagy energiát fog mutatni az első érzékelőn áthaladva, majd a már energiát veszített bomlási termék (ez esetben elektron) a második érzékelőn áthaladva kisebb energiát fog mutatni.

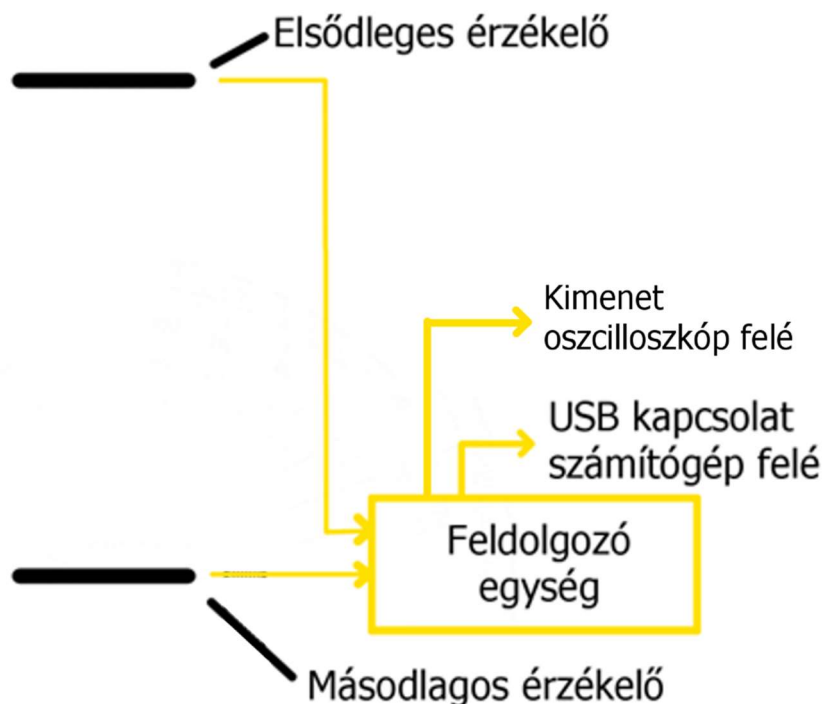
Ehhez a kísérlethez ugyan azt az érzékelő elrendezést fogom használni, mint korábban a kozmikus sugárzás irányának mérésére. Mivel müonok bomlását mérjük, ezért az irány érzékeny mérés továbbra is fontos.

Az érzékelők távolsága jelen esetben nem olyan fontos, mint korábban. Itt a célunk minél több müon befogása, tehát az érzékelő apertúrájának minél nagyobbak kell lennie,

viszont, ha túl közel van egymáshoz a két érzékelő, akkor kisebb az esélye annak, hogy a müon bomlása a két érzékelő közötti távon történik meg.

Ezen felül mindkét érzékelőt ólom árnyékolás nélkül használunk, hogy az alacsonyabb energiájú bomlási termékeket (elektront) ne hogy kiszűrjük.

Mindezeket figyelembe véve a mérés az alábbi ábra szerint épül fel:



24. ábra, Müonok bomlásának mérésére használt elrendezés

Ennél a konfigurációnál, a feldolgozó egységnek kisebb szerepe van. A feldolgozó egység ebben az esetben nem mér semmit, csak az 5V-os tápfeszültséget szolgáltatja.

A mérést egy oszcilloszkóp fogja végezni, mivel itt egyszerűen és pontosan be tudjuk állítani, hogy milyen jeleket rögzít a műszer. Tehát az oszcilloszkóp nem csak egy impulzusra figyel, hanem a müon áthaladása után a bomlási termék áthaladására is. Így ezzel a módszerrel pontos intervallum alapján tudjuk elkülöníteni a mért müonokat az alapján, hogy a bomlás végbement-e a kívánt helyen vagy nem.

Az oszcilloszkópot a méréshez a következő képen kell beállítani:

Az oszcilloszkópon a trigger funkciót úgy állítom be, hogy csakis két jeltüske egymás utáni megjelenésénél jelezzen, ha a második már nem haladja meg a beállított szintet. A két tüske időintervallumát pedig meg úgy állítjuk be, hogy a zaj változásánál nagyobb, de a müonok bomlásánál nem nagyobb idő intervallumot állítsunk be.

A korábbiakban elmondottak szerint a müonok maximális bomlási ideje tipikusan $2,2\mu\text{s}$ hosszúságú. Ebből következik, hogy ez lesz a felső időhatár, alsó időhatárnak pedig ennek a tizedét választjuk, hogy egy széles időtartamot lehessen megfigyelni.

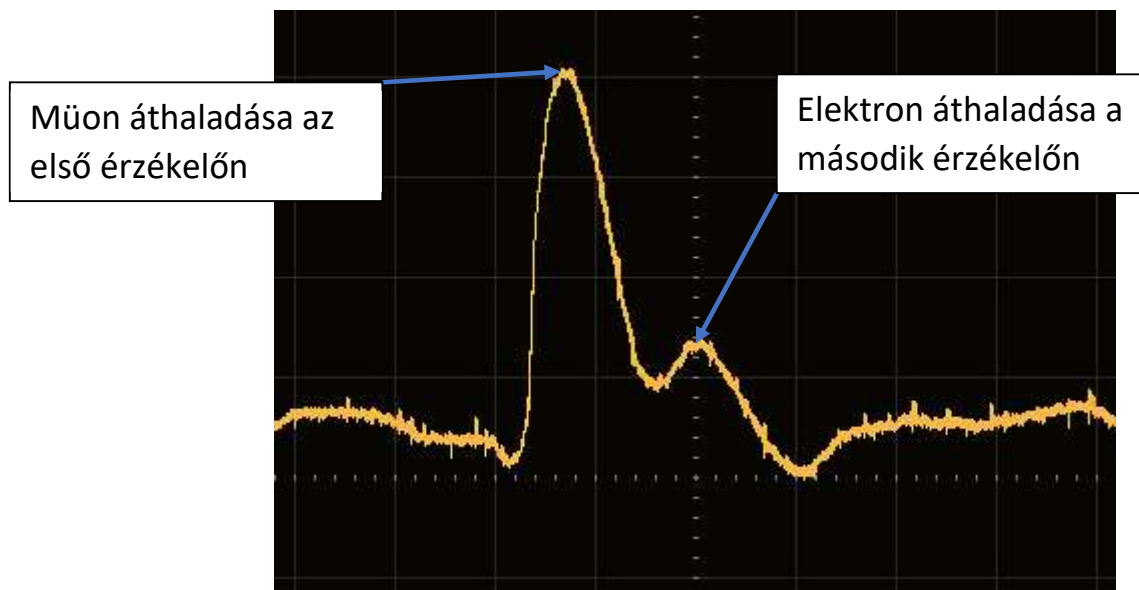
Feszültség korlátoknak a következőket választom: A müon áthaladás számára a maximális mérhető értéknél 20%-kal alacsonyabb értéke, hogy a nagy energiájú tüskékre szűrjünk, a

műszer esetében ez 400mV zaj felett. A bomlás terméknek, az elektron áthaladására pedig a már korábban mért béta sugárzás szintjét állítjuk be, 100mV zaj felett.

Ezekkel a beállításokkal időben be lehet határolni a megfigyelt intervallumot, és csak akkor rögzíti az oszcilloszkóp a mért értéket, amikor két egymást követő csökkenő energiájú túske mérhető.

Mivel az eszközt számtalan müon eléri, de ezek közül relatív kis mennyiségű bomlik le a két érzékelő közti részen, ezért a mérés hossza meglehetősen hosszú. Jelen esetben a műszerrel mért bomlási események 3-6 óránként következtek be. Egy 24 órás mérési periódus alatt 4-6 ilyen eseményt sikerült rögzíteni.

Az ilyen bomlási esemény a következő képen néz ki idő az idő függvényében:



25. ábra, Müonok bomlásának idődiagramja - Oszcilloszkópos mérés

Az ábrán látható jelalak teljességgel megegyezik azzal, amit a bomlási ábra alapján vártunk.

Az ábrán látható első feszültség túske, a müon első érzékelőn való áthaladását mutatja. A Feynman diagram alapján a következő túske egy alacsonyabb energiájú elektron, amit a mért értékek is alátámasztanak. A két túske között eltelt idő, szintén az, amit reméltünk, 1,85 μ s, a müon bomlási idejénél rövidebb időintervallum.

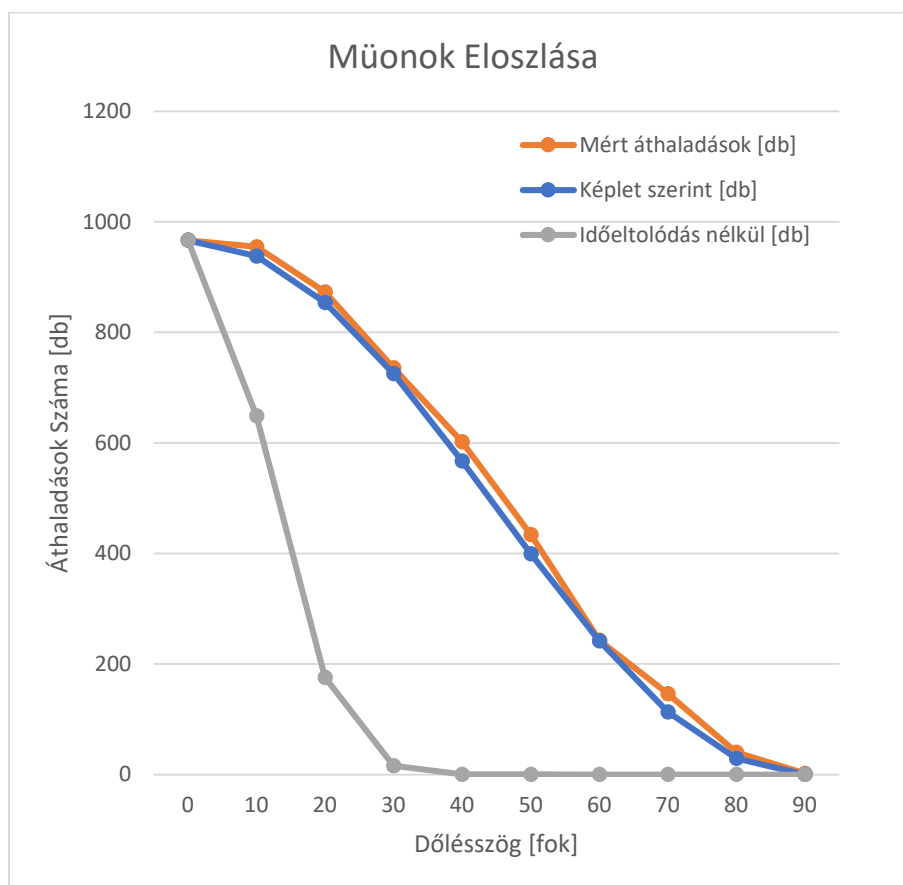
A korábban már megmért irány és az ebben a mérésben megmért bomlási folyamat alapján már biztosan megállapítható, hogy amit mért a műszer az kozmikus sugárzásból származó müonok.

Ahogy azt már az előbbieken bemutattam, a müonok ~15km [19] magasságban jönnek létre, és 0,3m/ns [21]sebességgel mozogva, függőleges beesés esetén, 50 μ s mire a föld felszínére érnek, ahol utána bomlásukat mérhettem. Ez azt jelenit, hogy a müonok jelen vonatkoztatási pontunkból 22szer lassabban bomlanak le, mint 2,2 μ s [19]. Tehát a müonok vonatkoztatási rendszerében az idő az általunk érzékelt idő 45%-a. Ebből arra következtethetünk, hogy az idő nagyobb sebesség esetén lassabban telik a külső, álló szemlélők számára.

Ezt az állítást alátámasztja ezen felül a már korábban bemutatott eloszlással kapcsolatos $\frac{n(\alpha)}{n(0)} = A \frac{1}{\cos(\alpha)}^{-1} \cdot \cos^2(\alpha)$ képlet is.

Ha az A értékét nem 1-re hanem az idő eltolódást figyelmen kívül hagyó értékre, $A = 10^{-10}$ -re választjuk, akkor látható, hogy 30-40 fokon túl már nem mérhetnénk jelentős mennyiséget. Viszont az idődilatációt figyelembe véve az adatok azokhoz az értékekhez közelítenek, amit a valós mérésünkben is megfigyelhettünk. Tehát, amit a müonok sűrűségét mérő kísérletben láthattunk, azoknak majdnem 100%-a ténylegesen müon volt, amelyeket befolyásolt az idődilatáció.

Az alábbi ábrában látható, hogy hogyan hasonulnak egymáshoz az esetek, ha függőleges helyzetben mind a három képletnél ugyan az a mennyiségű müon ér el a felszínre. Szürkével jelölve a müonok mennyisége az idődilatációt figyelmen kívül hagyó képlet szerint, kékkel a a valóságos képlet szerinti mennyiségek, és narancssárgával a ténylegesen mért értékek.



26. ábra, Müonok sűrűségének dőlésszögtől való függése, relativitáselméletet figyelembe véve és figyelmen kívül hagyva

A mérés konklúziója

A jelen dolgozatban végzett mérések során egyértelműen igazolódott, hogy az eredmények összhangban vannak az elméleti várakozásokkal és logikai következtetésekkel. Az észlelt részecskék a várakozásoknak megfelelő irányból érkeztek és az elvárt energiaszinteket mutatták. Továbbá, a műszer által rögzített események közül több esetben meghatározható volt a részecskék típusa a bomlási idő intervallum elemzésével.

A mérések körülményeinek és eredményeinek átfogó elemzése alapján megállapítható, hogy a dolgozatban bemutatott elméleti megfontolások és a korábbi forrásokban leírt magyarázatok a gyorsan mozgó részecskék viselkedésére vonatkozóan mérési adatokkal is alátámaszthatók. Ezek az eredmények megerősítik a speciális relativitáselmélet idődilatációs elméletét, amely szerint az idő érzékelése különbözik az eltérő vonatkoztatási rendszerekben és függ a sebességtől.

Az elvégzett kísérletek során a részecskék mozgási és bomlási paramétereinek pontos mérése lehetővé tette az idődilatáció jelenségének kvantitatív megerősítését. Az eredmények azt mutatják, hogy a gyorsan mozgó részecskék bomlási ideje jelentősen meghosszabbodik a külső megfigyelő számára, ami összhangban van a speciális relativitáselmélet előrejelzéseivel. Ezen mérések révén alátámasztható az eltérő vonatkoztatási rendszerekben tapasztalt időbeli különbségek és az, hogy ezek ténylegesen a mozgás sebességétől függenek, megerősítve ezzel az elmélet érvényességét és alkalmazhatóságát.

Összefoglalva, a dolgozatban ismertetett mérési eredmények és elméleti összefüggések szoros egyezést mutatnak, és szilárd alapot nyújtanak a speciális relativitáselmélet idődilatációs aspektusainak további kutatásához és megértéséhez. Az itt bemutatott adatok és következtetések kiegészítik a fizika ezen területén korábban végzett kutatásokat, és megerősítik a leírt elméletek helyességét.

Források:

1. ábra, Az elektromágneses hullámok spektruma	7
2. ábra, Foton többszöröző vákuum cső felépítése	8
3. ábra, A Gamma Spectacular és a Justin Atkin által készített mérő egység	9
4. ábra, Open Gamma Detector - Mattias Rosezky gammaspektroszkópja	10
5. ábra, CERN részecske detektor - Genfi egyetem	11
6. ábra, Anyagok első ionizációs energiája (kJ/mol)	12
7. ábra, A mikrokontrollerbe beérkező jelek – Oszilloszkópos mérés	15
8. ábra, LM358 kimeneti frekvencia függése – TI adatlap	17
9. ábra, 9V-os zaj szűrő áramkör rész - kapacitás többszöröző kapcsolás	19
10. ábra, A tápfeszültség zajtartalma - oszcilloszkópos mérés	20
11. ábra, komparátor befolyása a referencia feszültségre kondenzátor nélkül és kondenzátorral - Oszilloszkópos mérés	20
12. ábra, A műszer alap kapcsolása a követelmények alapján	21
13. ábra, A műszer megépített részei	22
14. ábra, A mikrokontroller által feldolgozandó jelek - Oszilloszkópos mérés	23
15. ábra, Tórium oxidos szövet mások által mért és a saját műszer által mért spektruma	26
16. ábra, Tórium bomlási sora	27
17. ábra, A kaonok bomlási lánc	28
18. ábra, A pionok bomlási lánc	29
19. ábra, A műszer appertúrájának számítása	30
20. ábra, Müionok mérésének felépítése/elrendezése	31
21. ábra, Irányméréshez használt műszer kapcsolása	32
22. ábra, Müionok sűrűsége dőlésszög függvényében - saját műszeres mérés / képlet alapú diagram	34
23. ábra, Müionok bomlási lánc	35
24. ábra, Müionok bomlásának mérésére használt elrendezés	36
25. ábra, Müionok bomlásának idődiagramja - Oszilloszkópos mérés	37
26. ábra, Müionok sűrűségének dőlésszögtől való függése, relativitáselméletet figyelembe véve és figyelmen kívül hagyva	38

- [1] nuclear-power.com, “nuclear-power.com,” 27 04 2023. [Online]. Available: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radioactive-decay/radioactive-decay-law/decay-constant/>.
- [2] S. László, Writer, *Anyagok bomlásának fajtái - Fizika 12.o.* [Performance]. 2019.
- [3] D. h. R. Ervin, Writer, *Részecskék energiája - Fizika II, OE 2.évf.* [Performance]. 2023.
- [4] Elelise, “Electromagnetic Spectrum,” 2023. [Online]. Available: <https://www.elelise.co.uk/gap6f.html>. [Accessed 24 04 2023].
- [5] space.com, “Gamma rays explained,” 2023. [Online]. Available: <https://www.space.com/gamma-rays-explained>. [Accessed 27 04 2023].

- [6] wikipedia.com, “Scintillator counters,” 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillation_counter#/media/File:PhotoMultiplierTubeAndScintillator.svg. [Accessed 27 04 2023].
- [7] ortech-online.com, “White paper-Why High-Purity Germanium (HPGe) Radiation Detection Technology is Superior to Other Detector Technologies for Isotope Identification,” 2019. [Online]. Available: www.ortec-online.com/-/media/ametektortec/technical%20papers/homeland%20security%20applications%20and%20chemical%20weapons%20assay%20pins/whyhighpuritygermaniumhpgeradiationdetectiontechnologysuperiorotherdetectortechologiesisotopeidentification.pdf?la=en. [Accessed 28 03 2023].
- [8] G. Spectacular, “Gamma Spectacular,” 2023. [Online]. Available: <https://www.gammaspectacular.com/>. [Accessed 05 04 2023].
- [9] T. T. Emporium, “YouTube - Detecting Anti Matter In Food - DIY Gamma Spectroscopy,” 2020. [Online]. Available: https://youtu.be/K16uPl6_S7A?t=669. [Accessed 25 04 2023].
- [10] M. Rosezky, “GitHub.com - Open Gamma Detector,” 2019. [Online]. Available: <https://github.com/OpenGammaProject/Open-Gamma-Detector>. [Accessed 25 04 2023].
- [11] angelo.edu, “angelo.edu - Periodic Trends - Ionization Energy,” 2018. [Online]. Available: https://www.angelo.edu/faculty/kboudrea/periodic/trends_ionization_energy.htm. [Accessed 27 03 2023].
- [12] T. Károly, Writer, *Elektrotechnika - Diódák felépítése és működése*. [Performance]. 2017.
- [13] espressif, “ESP32 - Analog To Digital Converter,” 2020. [Online]. Available: <https://espressif-docs.readthedocs-hosted.com/projects/espressif-esp-faq/en/latest/software-framework/peripherals/adc.html>. [Accessed 28 03 2023].
- [14] F. Semiconductor, “All Datasheet - KST5089 Datasheet pdf,” 2002. [Online]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.net/datasheet-pdf/view-marking/53553/FAIRCHILD/KST5089.html>. [Accessed 10 03 2023].
- [15] Onsemi, “LM358 datasheet,” 2016. [Online]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm358-d.pdf>. [Accessed 25 03 2023].
- [16] D. L. Jones, Writer, *How to remove power supply ripple*. [Performance]. 2019.
- [17] web1, “Thoriated Lantern Mantle Gamma-Ray Spectrum,” 2004. [Online]. Available: <https://www.randomuseless.info/spectra/results/mantles/index.html>. [Accessed 20 03 2023].
- [18] N. D. -. ToRi, “Table of radioactive isotopes,” 2010. [Online]. Available: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=820212>. [Accessed 11 03 2023].
- [19] B. Rossi, “Interpretation of Cosmic-Ray Phenomena,” *Journals aps*, 1948.

- [20] Wikipedia, “Wikipedia - Particle physics of Kaons,” 2023. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kaon#/media/File:Kaon-Decay.svg>. [Accessed 20 04 2023].
- [21] L. Liu, “mit.edu - The Speed and Lifetime of Cosmic Ray Muons,” 2007. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/lululiu/Public/pixx/not-pixx/muons.pdf>. [Accessed 10 03 2023].
- [22] Wikipedia, “Wikipedia - Particle physics of Pions,” 2023. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pion>. [Accessed 20 04 2023].
- [23] S. László, Writer, *Einstein relativitás elmélete - Fizika 12.o.* [Performance]. 2019.
- [24] E. B.V., “Science direct - Experimental searches for muon decays beyond the Standard Model,” 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405428318300601>. [Accessed 26 03 2023].
- [25] G. University, “MDPI - Smartphone and Tablet-Based Sensing of Environmental Radioactivity,” 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4264>. [Accessed 25 04 2023].
- [26] i. Nachi, “Thorium decay chain,” 2008. [Online]. Available: <https://www.nachi.org/gallery/radon/thoron-decay-chain>. [Accessed 26 03 2023].

Saját eredmények összefoglalása és saját magam által elvégzett munkák listászerű összefoglalója

Saját eredmények összefoglalása:

- Megterveztem a gamma-spektrométert külföldi irodalom és korábbi műszerek alapján
- Megépítettem a műszer próbapanelon majd próbanyákon.
- Kalibráltam a spektrométert tórium oxiddal átitatott lámpa szövettel.
- Meghatároztam a műszer energia skáláját a ^{212}Pb és ^{208}Ti energiacsúcsok segítségével.
- Jellemző gamma sugárzás energiaspektrumokat állítottam elő.
- Igazoltam az idődilatáció jelenségét gyorsan mozgó részecskék bomlási paramétereinek mérésével.
- Validáltam az eredményeket a speciális relativitáselmélet előrejelzései alapján.
- Fejlesztettem mérési módszereket a gamma sugárzás pontos mérésére.
- Elemzéseket végeztem a spektrumok rögzítésével és értékelésével.
- Eredményeim hozzájárultak az idődilatáció elméleti megerősítéséhez.

Saját magam által elvégzett munkák:

- Elektronikai áramkörök tervezése és építése.
- Mikrokontroller programjának elkészítése az áramkör ismeretével.
- Műszer kalibrálása és spektrum energia skálájának meghatározása.
- Spektrumok rögzítése és elemzése.
- Gamma sugárzás mérésére szolgáló adatok gyűjtése és feldolgozása.
- Energiaspektrumok létrehozása az összegyűjtött adatok alapján.
- Kozmikus sugárzásból származó részecskék mérése
- Az idődilatáció vizsgálata részecske eloszlás méréssel
- gyorsan mozgó részecskék bomlási idejének mérésével.
- Eredmények összevetése korábbi kutatásokkal és elméleti modellekkel.
- Dokumentáció készítése a dolgozathoz.
- Az eredmények prezentálása és értelmezése az idődilatáció kontextusában.