

**Óbudai Egyetem**  
**Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar**  
**Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék**



**TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT**

# **GAMMA SPEKTROMÉTER TOVÁBBFEJLESZTÉSE**

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

**Konzulens:** Sándor Tamás  
egyetemi tanársegéd

**Budapest, 2024.**

|           |                                                                      |           |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>TÉMAVÁLASZTÁS .....</b>                                           | <b>3</b>  |
| <b>2</b>  | <b>BEVEZETŐ .....</b>                                                | <b>4</b>  |
| <b>3</b>  | <b>ELMÉLETI BEVEZETŐ, AMIT A RADIOAKTIVITÁSRÓL TUDNI KELL .....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>4</b>  | <b>AZ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁS FAJTÁI .....</b>                             | <b>7</b>  |
| 4.1       | ALFA SUGÁRZÁS .....                                                  | 7         |
| 4.2       | BÉTA SUGÁRZÁS .....                                                  | 7         |
| 4.3       | GAMMA SUGÁRZÁS .....                                                 | 7         |
| <b>5</b>  | <b>AMIT AZ IONIZÁLÓ ELEKTROMÁGNESES SUGÁRZÁSRÓL TUDNI KELL .....</b> | <b>8</b>  |
| <b>6</b>  | <b>MÁSOK ÁLTAL KÉSZÍTETT MŰSZEREK .....</b>                          | <b>9</b>  |
| <b>7</b>  | <b>SZCINTILLÁTOR ANYAGOK ÉS TULAJDONSÁGAIK .....</b>                 | <b>13</b> |
| 7.1       | A SZCINTILLÁTOR ANYAGOK ALAPELVE .....                               | 13        |
| 7.2       | GYAKRAN HASZNÁLT SZCINTILLÁTOR ANYAGOK .....                         | 14        |
| <b>8</b>  | <b>FOTONOK DETEKTÁLÁSÁNAK MÓDJAI .....</b>                           | <b>16</b> |
| 8.1       | GYAKRAN HASZNÁLT DETEKTOROK .....                                    | 16        |
| <b>9</b>  | <b>MŰSZER KÖVETELMÉNYEK .....</b>                                    | <b>18</b> |
| <b>10</b> | <b>ALKATRÉSZEK VÁLASZTÁSA .....</b>                                  | <b>19</b> |
| 10.1      | A MŰSZER MIKROKONTROLLERE .....                                      | 19        |
| 10.2      | A SUGÁRZÁST MÉRŐ ESZKÖZ .....                                        | 20        |
| 10.3      | A JELERŐSÍTŐ .....                                                   | 20        |
| 10.4      | KOMPARÁTOR ÉS TRIGGER JEL .....                                      | 21        |
| <b>11</b> | <b>A MŰSZER FELÉPÍTÉSE .....</b>                                     | <b>22</b> |
| 11.1      | TÁPELLÁTÁS .....                                                     | 22        |
| <b>12</b> | <b>A MŰSZER KAPCSOLÁSA .....</b>                                     | <b>26</b> |
| <b>13</b> | <b>A MŰSZER SZOFTVERE .....</b>                                      | <b>28</b> |
| <b>14</b> | <b>A MŰSZER KALIBRÁLÁSA .....</b>                                    | <b>33</b> |
| <b>15</b> | <b>ELEMI RÉSZECSKÉK ÉS ELLENTETTJEIK .....</b>                       | <b>36</b> |
| <b>16</b> | <b>BOMLÁSI FOLYAMATOK SUGÁRZÓ ANYAGOKBAN .....</b>                   | <b>38</b> |
| <b>17</b> | <b>ANTIANYAG DETEKTÁLÁSÁNAK FOLYAMATA .....</b>                      | <b>39</b> |
| 17.1      | A MÉRÉS FELÉPÍTÉSE .....                                             | 40        |
| 17.2      | A MÉRÉS FOLYAMATA .....                                              | 40        |
| <b>18</b> | <b>ANTIANYAG DETEKTÁLÁSA EGY BANÁNBAN .....</b>                      | <b>42</b> |
| 18.1      | A MÉRÉS KONKLÚZIÓJA .....                                            | 42        |
| <b>19</b> | <b>FORRÁSOK .....</b>                                                | <b>44</b> |
| 19.1      | ÁBRAJEGYZÉK .....                                                    | 44        |
| 19.2      | HIVATKOZÁSOK .....                                                   | 45        |

## **1 Témaválasztás**

Ahogy, ezt korábban már megtapasztaltam különféle projektjeim során, az atomfizika, habár első ránézésre meglehetősen félelmetes és komplikált téma, ha kicsit jobban mögé nézünk a dolgoknak, akkor inkább egyszerű és szórakoztatónak vélhető.

Több mint tíz éves hobbi tevékenységem során számos eszközt építettem, ami kapcsolódott az atomfizikához ilyen-olyan módon, de egészen két évvel ezelőttiig nem foglalkoztam a témával komolyabban. Ennek oka a látszólagos komplexitása minden ilyen eszköznek, és a szintén látszólagos információ hiány ezekkel kapcsolatban. Ahogy hobbi tevékenységeim során kiderült, csak keresni kell egy kicsit, hogy információt találjunk mindezekről.

Amikor középiskola végén egy amatőr műhold építése során megismertem Dudás Levente tanár urat, ő elmesélt egy módot, hogy a SMOG 1-en miként is oldották meg a sugárzás mérést. Egy egyszerű diódás kapcsolás, amit bárki megépíthet. Ez indított el engem a diódás sugárzás mérő készülékek iránti érdeklődésem útján.

Az érdeklődésem végül az előző évi Tudományos Diákköri Konferencián csúcsosodott ki, aminek alkalmából megalkottam saját diódás sugárzás mérőeszközömet, amit nem csak megépítettem, hanem különféle kozmikus sugárzás fajtákat is mértem vele. Az eszközöm egy nagyon tanulságos projektté alakult át, ami végül a konferencián nagy sikert ért el. A projekt során kiderültek különféle hiányosságok, valamint fejlesztési lehetőségek, így már akkor is gondolkodtam egy új és jobb eszköz tervein. Ez a továbbfejlesztett eszköz a jelenlegi dolgozat témája. Egy gammaspektrométer, ami nem csak képes ugyan azokra a feladatokra, mint az elődje, de nagyban javít a pontosságán, használhatóságán és hordozhatóságán.

De hogy mire is lehet ezeket a fejlesztéseket használni? Nem csak szimpla anyagvizsgálatra, amire az előző verzió készült, hanem nagyobb pontosságot igénylő mérésekre is, ahova már nem elég egy szimpla dióda a méréshez. Ezzel az eszközzel képesek lehetünk megmérni új anyagok keletkezését, az ezekből származó részecskék bomlási folyamatát, és talán kísérleteink során még antianyagot is találhatunk. Mindezt az előző műszerhez hasonló, ám jóval fejlettebb eszközzel.

## 2 Bevezető

Az előző évi dolgozatomhoz hasonlóan a célom egy olyan lehetőség megvizsgálása, majd ezen alapokon egy műszert megépítése, amely szilícium félvezető alapokon működő sugárzásmérést valósít meg. Az előző évi dolgozattal szemben viszont, ezúttal a legfontosabb szempont nem az alkatrészek árának alacsonyan tartása, hanem a műszer lehető legpontosabb mérési képességének elérése a lehető legolcsóbb alkatrészekkel.

A dolgozatban bemutatom majd miként fejlesztettem tovább a meglévő műszert, milyen méréseket végeztem vele, majd a dolgozat utolsó harmadában bemutatom majd miként sikerült antianyagot találnom egy mindennapi ételben.

Mindehhez, a műszernek nem csak sugárzást kell majd mérnie, hanem a sugárzó részecskék intenzitását is tudnia kell mérnie. Így a korábbi műszerhez hasonlóan egy gammaspektrométert építettem, amely képes egy diagrammal ábrázolni a vizsgált anyag által kibocsájtott sugárzás összetétel ábrázolására. És ahogy már említettem, ezúttal a pontosság a fontosabb, nem pedig a műszer olcsósága.

Korábbi dolgozatomban két fő érzékelési módot említettem, amely a pontossági-költséghatékonysági skála két végén található. A legdrágábbak, de egyben legpontosabb megoldást a szcintillátor kristályos mérőeszközök adják, de a korábban általam épített műszer egy szimpla diódás érzékelőt használt.

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.

Ezzel szemben, amit én készítettem korábban műszert, az a sugárzó részecskék ionizáló képességét használja ki. Ennél az érzékelő fajtánál a sugárzás útjába kerülő szilícium lap válik elektromosan vezetővé és a kialakult vezető réteg ellenállásának nagysága alapján lehet a sugárzás erősségére következtetni. Viszont, ahhoz, hogy a mérés pontos legyen, vagy nagyon stabil táp és mérési feszültségek kellenek, vagy a szilíciumnak kell nagyon tisztának lennie. Ezúttal számomra ez már nem elég. Ha antianyag jeleit szeretném keresni, nekem egy pontos műszerre lesz szükségem, így a lehetséges műszerek közül egy harmadik megoldást választottam.

A dolgozat készítése során egy kisebb méretű szcintillátor kristályt használva készítettem egy olyan detektort, ami nem egy drága és nagy vákuumcsövet használ, hanem egy SiPM (Silicon Photo Multiplier) diódát, ami a szcintillátor kristályból jövő fotonokat fogja majd mérni. Ezzel a módszerrel keverhetjük a két megoldás pozitívumait, tehát egy pontosabb műszer kapunk, mint egy szimpla diódás detektorral, de nem kell a vákuumcsőhöz használt nagyfeszültségű táp se az azokhoz használt nagy méretű szcintillátor kristály. így lesz a projekt relatív olcsó viszont sokkal pontosabb, mint az előző műszerem.

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, amelyeket majd megvizsgálva tudok következtetéseket levonni.

### 3 Elméleti bevezető, amit a radioaktivitásról tudni kell

A radioaktivitás az instabil atomok bomlásából származó részecskékből ered. Minden olyan atom, amelynek legalacsonyabb energia állapotbeli felépítéséhez képest több energiája van, instabilnak tekinthető, és ennek következtében a fölös energiát hajlamos leadni különböző módokon. Az ilyen instabil atomok radioaktív bomláson mennek keresztül, amelynek következtében ionizáló sugárzást bocsájtanak 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, és mivel minden részecske bomlási folyamata más-más energia mennyiséget igényel ezért ez a folyamat minden anyagra nézve egyedi és ez alapján azonosítható.

Az instabil anyagok bomlási sugárzása véletlenszerű időközönként történnek, így csak valószínűségi képlettel lehet leírni annak folyamatát.

A valószínűségi képlethez első sorban szükségünk van az adott anyag bomlási állandójára. A bomlási állandó definíciója a következő képlet alapján számolható ki [1]:

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

- $\lambda$ : 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
- $\lambda$ : a bomlási állandó
- $t$ : eltelt idő [s]

A képlet alapján látható, hogy az instabil anyag bomlásának valószínűsége exponenciálisan csökken a létrejöttüktől számított idő elteltével. Ez a képlet minden instabilnak tekintett anyagra igaz, tehát a későbbi kísérletekben leírt anyagokra is.

## **4 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 részecskéknél, ezáltal ionizálja azokat. Ezen ionizáló tulajdonsága miatt vagyunk képesek érzékelni az e féle sugárzás fajtákat.

Az ionizáló sugárzásnak három fő fajtája van [2] [3]:

### **4.1 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 olyan terekben, ahol más részecskék is tartózkodnak, legtöbb esetben 2-5 cm-t levegőben.

### **4.2 Béta sugárzás**

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

Mivel méretük jóval kisebb, mint az alfa részecskéé, ezért annak a valószínűsége, hogy más részecskékkal kölcsönhatásba lépjen kisebb, tehát hatótávuk is nagyobb, 2-7 métert képesek megtenni levegőben.

### **4.3 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.

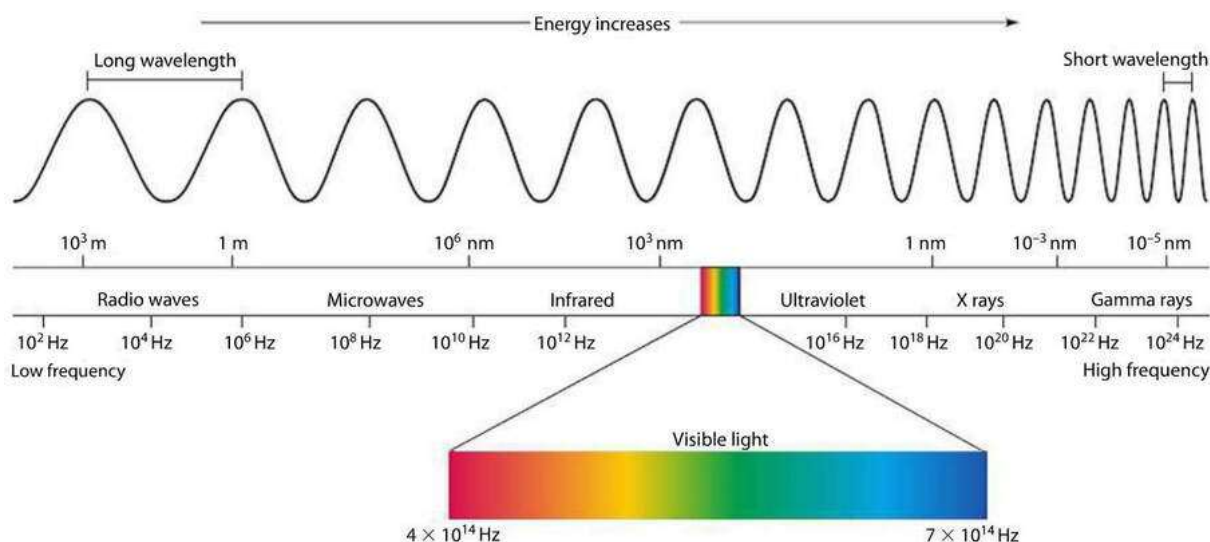
## 5 Amit az ionizáló elektromágneses sugárzásról tudni kell

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 változó 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]
- $\lambda$ : A foton hullámhossza [m]

Ahhoz, hogy ionizálni tudjunk egy anyagot elektromágneses hullámokkal, vagy növelnünk kell a fotonok egy impulzusban érkező 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.



1. ábra, Az elektromágneses hullámok spektruma [4]

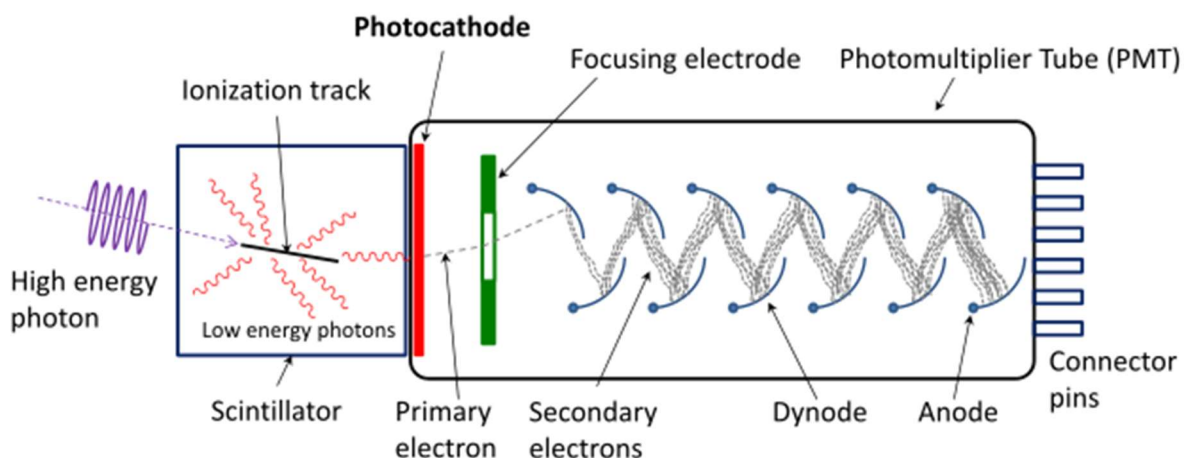
Az elektromágneses teljes spektrum mindkét „végén” létrejöhet ionizáló sugárzás. Nagyobb teljesítményű rádióadók képesek ionizálni a körülöttük lévő levegőt a kisugárzott több kilowattos teljesítményük révén, viszont, ha a spektrum rövid hullámhosszok felől eső oldalát nézzük, gamma sugárzást kibocsájtó 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).

## 6 Mások által készített műszerek

A gamma spektrométerek között számos olyan van, amelyeket nagy cégek készítettek más 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 a 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 „photomultiplier”, ami úgyszintén egy relatív drága eszköz. [6] Ebben a csőben egy sor elektromosan töltött kis méretű, de kissé homorúra hajlított fémlemezek vannak, 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-díjat 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 egy nagyon alacsony zajú 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 és jel-zaj viszonyra lenne képes [7].

A hobbi környezet ezzel 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, ahol a jel analízisa meglehetősen egyszerű a különféle erre a célra készített programokkal.

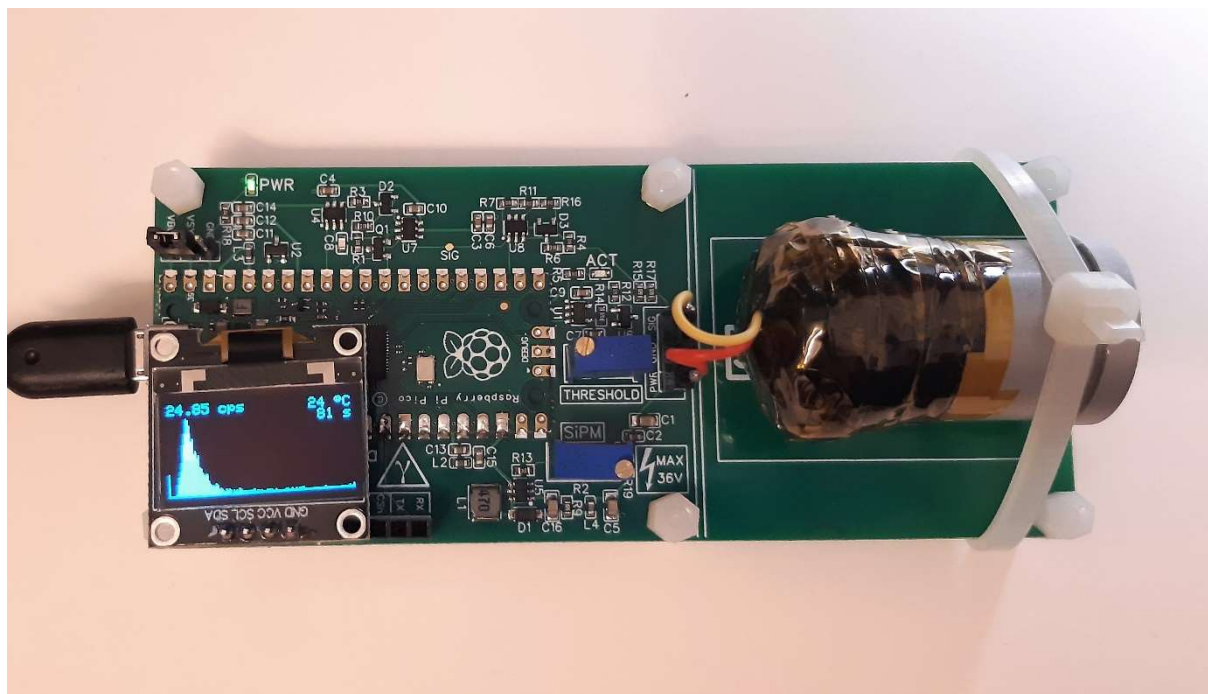
Ez az eszköz csakis az elektronikai része a gammaspektrométernek, ugyanis magát a mérőfejet a felhasználónak kell megépítenie. A felhasználó maga döntheti el, hogy milyen típusú érzékelőt használ, de a Gamma Spectacular elsősorban szcintillátor kristályos érzékelőkhöz készült. Viszont ebben a termékben 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 szcintillátorokat.

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, legtöbbjük 1 kV-os feszültséget igényel, ami közel sem biztonságos azok számára, akiknek nincs ilyen

feszültségszintű munkavégzésben tapasztalata. Ezen felül maga az eszköz is nagy, és ezért kényelmetlen használni, a profi eszközökhöz hasonlóan.

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 hármass egyensúlyt testesít meg az ár, az egyszerűség és pontosság tekintetében. Éppen ezért ebben a dolgozatban leírt fejlesztéseknek is a célja az ehhez hasonló műszer elkészítése.

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 előző évi dolgozatomban szereplő 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.

Ezen műszer egyszerűségét és a Mattias Rosezky által készített Open Gamma detektor pontosságát szeretném kombinálni a későbbiekben egy olyan műszerré, ami a lehető legolcsóbb, de mégis jobb pontosságot biztosít, mint a szimpla diódás megoldás.

## 7 Szcintillátor anyagok és tulajdonságaik

### 7.1 A szcintillátor anyagok alapelve

Ahhoz, hogy megértsük mitől lesz jó egy anyag spektrum méréshez, előbb meg kell értenünk miként működik egy szcintillátor.

Alapvetően azokat az anyagokat, amelyek sugárzás hatására látható fényt bocsátanak ki, szcintillátornak nevezzük. Minden ilyen anyag egy alapvető elven működik, a gerjesztett és gerjesztetlen energia állapot közötti váltás.

Alap esetben a szcintillátor gerjesztetlen állapotban van. Amikor egy ionizáló részecske vagy nagy energiával rendelkező elektromágneses hullám halad át az anyagon, az elnyeli annak energiáját, aminek következtében az anyag atomjának elektronjai magasabb energia szintre lépnek. Mivel minden anyag a lehető legalacsonyabb energia szintre törekszik, ezért a szcintillátor kis időn belül ezt az elnyelt energiát le fogja adni. Jelen vizsgált esetekben ez az energia leadás egy látható tartományban lévő fény (foton) impulzus formájában jelenik meg. Ezt a fény impulzust tudjuk majd a későbbiekben érzékelni és karakterizálni.

Mindent figyelembe véve, elsősorban karakterizálnunk kell a folyamat paramétereit az egyes anyagok esetében. Ehhez tudnunk kell az energia mennyiséget, ami kell a szcintillátor anyag atomjainak gerjesztéséhez. Ahhoz, hogy ezt ki tudjuk számolni, szükségünk lesz az adott anyag alapállapotú energiaszintjére. Ezt az alábbi képlettel tudjuk kiszámolni [11]:

$$E_g = -\left(\frac{\alpha^2 mc^2}{2}\right)$$

- $E_g$ : Anyag alap állapotú energia szintje [eV]
- $\alpha$ : Finomszerkezeti állandó
- $m$ : Anyag tömege [kg]
- $c$ : Fény sebessége [m/s]

Miután az alapállapotú energia szintet tudjuk, azt be tudjuk helyettesíteni az  $n$ -edik gerjesztési szint képletébe. Ezt az alábbi képlet segítségével tudjuk kiszámolni [12]:

$$E_n = -\left(\frac{E_g}{n^2}\right)$$

- $E_n$ : Az  $n$ -edik gerjesztési szint energiája [eV]
- $E_g$ : Az anyag alapállapotú energia szintje [eV]
- $n$ : A gerjesztési szint sorszáma

Ezt a képletet felhasználva kiszámolhatjuk, hogy mennyi a különbség két gerjesztési szint között. Egyszerűen csak külön-külön ki kell számolnunk, hogy egyes gerjesztési szinteknek mekkora az energiája, majd a nagyobb gerjesztési szint energiáját ki kell vonni a kisebbéből. A számunkra fontos érték ez a szám lesz.

Minden szcintillátor anyag gerjesztési és alapállapotba való visszaállása egyenként egyszerre történik. Egy részecske vagy elektromágneses hullám áthaladása során az anyag által elnyelt energia egy időben nyelődik el, majd egy időben is adódik le. Az energia leadás során a szcintillátor anyagból a felesleges energia egy foton formájában távozik, melynek energiája megegyezik a korábban elnyelt energiával.

Mivel az anyag molekulái csak egy a szerkezetükből adódó szintig képesek gerjedni, ezért a szcintillátor egyes molekulái által kiadott fény mindig egy adott hullámhosszú fényt fognak kibocsájtani. Az egyes események között csak annyi különbség van, hogy a szcintillátor molekulái közül mennyit képes gerjeszteni a sugárzás, amíg az összes energiáját el nem nyelte a szcintillátor. Így látható, hogy a sugárzás mérése során az események során egyszerre keletkezett fotonok mennyisége fogja megadni a részecske vagy elektromágneses hullám energiáját.

## **7.2 Gyakran használt szcintillátor anyagok**

Jelen dolgozat célja, hogy egy már létező műszeren javítson. Éppen ezért egyszerűbb, ha megvizsgáljuk milyen anyagokat használnak más létező műszerek, valamint azt, hogy azok közül melyek azok, amelyek el is érhetőek számunkra.

### **7.2.1 Bicron – Az olcsó választás**

Azokban a műszerekben, ahol nem a spektrum mérés az elsődleges cél, hanem például csak a szimpla dózis mérés, ott legtöbb esetben Bicront használnak. A Bicron az egy olyan műanyag, amely képes a szcintillátoroktól elvárt működésre, olcsó és könnyen előállítható. Ezen felül a gerjesztéséhez szükséges energiája meglehetősen alacsony, így majdnem minden fajta sugárzásra reagál

Mindezen jó tulajdonságai ellenére spektrum mérésre közel alkalmatlan. Bár majdnem minden alkalommal ad fény impulzust, azok 10-20% pontossága összehasonlítható egy szimpla Geiger cső pontosságával. Ez a pontatlanság az anyag alapvető tulajdonságaiból adódik. Műanyag révén nincs szabályos kristályszerkezete. Ez befolyásolja a sugárzás útjába kerülő molekulák számát. Szintén amiért egy műanyag, ezért áttetszősége a saját maga által generált fényre nem tökéletes és attól függően, hogy a sugárzás milyen utat tesz meg az anyagban, attól függően lesz nagyobb vagy kisebb a csillapítása. Továbbá amikor kilép az anyagból a generált fényimpulzus, a nem egyenletes felülete miatt további szóródás és visszaverődés történhet.

### **7.2.2 HPGe – A profi választás**

Azokban a műszerekben, amelyeket komolyabb kutatási célokra használnak, csakis HPGe, azaz „High Purity Germanium” szcintillátort használnak. Ennek az anyagnak az előnye, hogy nagyon pontos impulzusokat ad vissza minden egyes eseményre. Közel 0.7% pontosságú.

A HPGe szabályos kristályszerkezete ideális az anyag által generált fény vezetésére, alacsony gerjesztési energiája nagy felbontást biztosít, valamint magas atom száma miatt gamma sugarakra jobban érzékeny, mint a legtöbb szcintillátor anyag. Ezen felül sok esetben még hűtve is szokták használni, tehát a generált fény szabadabban képes mozogni az anyagban ütközés nélkül. Viszont ennek a pontosságnak meg van az ára.

Kristályról lévén szó, előállítása nagyon drága és bonyolult, valamint legtöbb esetben az érzékelőkhöz használt formát további feldolgozási lépésekkel lehet csak elérni. Éppen ezért szimpla hobbi célokra használt szcintillátorokhoz ez egy kevésbé megfelelő anyag.

### 7.2.3 NaI(Tl) – Az optimális választás

Legtöbb kézi, vagy tájékoztató jellegű műszerben NaI(Tl) avagy Tallium-Nátrium-Jód szcintillátort használnak. Ez szintén egy kristály, amelynek a germániumhoz hasonló jó tulajdonságai vannak, viszont előállítási folyamatából adódóan nem olyan tökéletes.

A NaI(Tl) szcintillátorokhoz használt alap kristályt ugyanúgy növesztik, viszont nem olyan módon mint a germániumot. Míg a germánium kristályokat magas hőmérsékleten készítik, addig a Nátrium-Jód kristályokat nem kell megolvasztani ehhez. Viszont ez azt jelenti, hogy a folyamat során a kristályba került szennyeződések és hibák gyakrabban előfordulhatnak. Ezen felül a Nátrium-Jód kristály előállítása után a Talliumos adagolás (doping) nagy hőmérsékleten a kristály felületén keresztül történik, ami egy másik forrása lehet a pontatlanságnak.

Mindezeket figyelembe véve a tipikus maximum pontatlansága 10% a NaI(Tl)-nek, ami esetünkben teljességgel megfelelő, és a kristály relatív megfizethető ára is előnyös. Éppen ezért a későbbiekben ez lesz a detektor szcintillátora.

## 8 Fotonok detektálásának módjai

Az előző részben láthattuk, hogy jelen esetben a szcintillátoros detektort érdemes használni. Viszont a szcintillátor csak az egyik része a detektornak. Az abból kilépő fény impulzusokat valahogy érzékelnünk és megmérnünk is kell. Erre több lehetséges módszer van, ahogy ezt már a mások által készített műszerekről szóló fejezet is szemléltette, viszont ez nem minden. Tudnunk kell az előnyeit és hátrányait az egyes lehetőségeknek, hogy el tudjuk dönteni melyiket válasszuk.

### 8.1 Gyakran használt detektorok

Jelen dolgozat célja, hogy egy már létező műszeren javítson. Éppen ezért egyszerűbb, ha megvizsgáljuk milyen detektorokat használnak más létező műszerek, valamint azt, hogy azok közül melyek azok, amelyek el is érhetőek számunkra.

#### 8.1.1 Fotodióda – Az olcsó választás

A fotodióda az egyik legegyszerűbb módja a fény érzékelésnek. Ez a fajta dióda egy szimpla PIN dióda, amely feszültséget generál a kimenetén amikor fény éri, vagy ha záró irányban van bekötve, tehát úgy adunk rá feszültséget, hogy azon áram nem folyik, akkor fény hatására vezetővé válik a dióda. Mind a két esetben egy szimpla erősítő kapcsolással ezt a jelet fel lehet erősíteni, és így megmérhetjük egy mikrokontrollerrel.

A fotodiódás megoldás az egyik legolcsóbb megoldás, mivel maga a dióda nem speciális, majdnem mindenhol kapható, valamint a működtetéséhez sem kell semmilyen szokatlan dolog. Viszont ennek az olcsóságnak ára van. Ez a fajta dióda nem olyan érzékeny a fényre, mint a többi lehetséges érzékelő fajta, valamint nem olyan hatékony a fény elektromosjellé való átalakításában sem, mint a többi megoldás. Ez összességében pontatlanabb és zajosabb mérést fog eredményezni.

#### 8.1.2 Fotontöbbszöröző vákuumcső – A profi választás

A szintén már korábban bemutatott 2. ábrán szereplő vákuumcső alapú megoldást használja a profi műszerek majdnem mindegyike. Ennél az érzékelőnél a mérési pontatlanság nagyon kevés féle dologból jöhet, ezért ez az egyik legpontosabb megoldás. Alapvetően két lehetséges hiba jöhet fel: Egyik, ami a leggyakoribb, hogy a csőben lévő elektromosan töltött lemezeknek a feszültsége egymáshoz képest nem lineárisan csökken. Az ilyen csövekben a cél mindig az, hogy az egyes lemezekről felszabaduló elektronok a bejövő elektronok számával mindig ugyan olyan arányos legyen. Tehát ha a második lemezen egy darab beérkező elektron két másikat szabadít fel az anyagban, akkor mindegyik lemezen ennek kell lennie az aránynak. Ezt csakis pontos nagyfeszültségű táppal lehet elérni, aminek mérete, energia fogyasztása és veszélyessége miatt nem ideális hobbi célú eszközökben használni.

Mindezekon felül maga a fotontöbbszöröző cső is meglehetősen nagy méretű és drága, tehát jelen esetben az eszközhöz nem egy jó megoldás.

### 8.1.3 SIPM – Az ideális választás

A diódás mérési formáknak egy alváltozata az SIPM azaz „Silicon Photo Multiplier”. Ez a fotodióda kívülről ugyanúgy néz ki, mint bármely másik fotodióda, de ebben a dióda fajtában több egymástól független úgynevezett lavina dióda található. A lavina dióda az egy olyan erősen adagolt dióda fajta, aminek egy nagyon meredek letörési karakterisztikája van. Amikor a diódát záró irányban kötjük be és a feszültséget úgy állítjuk be, hogy az a lehető legközelebb legyen a letörési feszültséghez, akkor ezzel a fotodiódával egy foton érzékenységet is el lehet érni. Mivel a diódának nagyon meredek letörési karakterisztikája van, ezért egy nagyon kis külső energia változásra is nagyon nagy áramváltozás következik be a diódán.

Mindezeket figyelembe véve, láthatjuk, hogy a SiPM detektor használata ugyan olyan egyszerű, mint egy sima PIN diódának, és nem igényel semmilyen bonyolult áramkört mind a többi megoldás. Ezen felül egy SiPM dióda meglehetősen olcsóbb, mint egy fotontöbbszöröző vákuumcső, miközben pontossága megközelíti azt.

## 9 Műszer követelmények

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

- Mivel a műszernek hordozhatónak kell lennie, a műszer áramkörének mérete kulcs fontosságú. A cél a minél kisebb fizikai méret és az áramkör lehető legalacsonyabb alapjáratú áramfelvétele, hogy a tápláló akkumulátor a lehető leghosszabb üzemidőt tudja biztosítani.
- Az áramkör által keltett elektromos zajok ellen való védekezésre zajsűrű 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 zajsűrű 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 át kell tudnia adnia, viszont egy beépített kijelzőn kell, hogy kijelezze elsősorban.

Mivel a jelen dolgozatban leírt műszer az előző évi dolgozatomban leírt tovább fejlesztett változata, ezért a követelmények nagy része megegyezik, és csak pár dologban tér el a korábbtól.

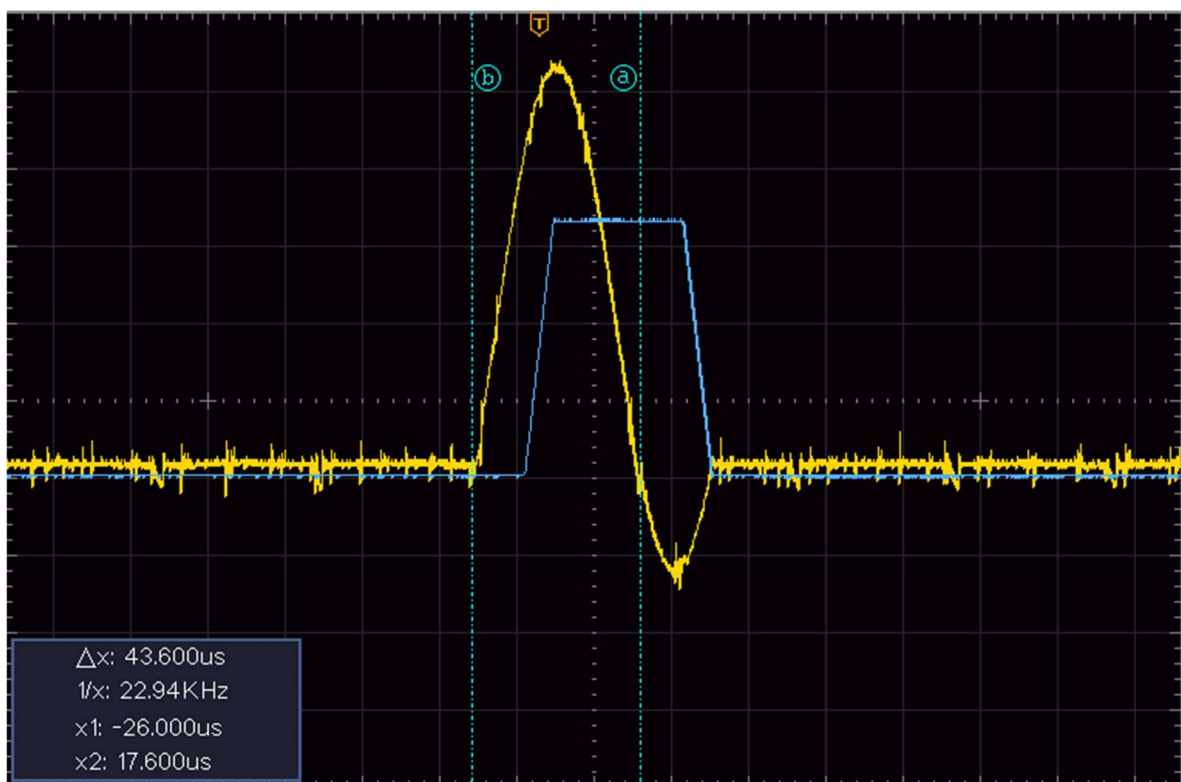
## 10 Alkatrészek választása

### 10.1 A műszer mikrokontrollere

A műszer legfontosabb eleme a mikrokontroller, amely fogadja a beérkező jeleket, feldolgozza az adatokat, és kijelzi azokat a beépített kijelzőn, vagy tovább küldi azt a számítógép felé.

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 ábrázolja azt a tipikus bejövő jelet, amelyet a mikrokontrollernek mérnie kell. Amint az érzékelőből érkező jel átlépi a potenciométerrel beállított feszültséget, a komparátor kimenete 0-ból 1-be vált. A mikrokontrollernek ezekre a jelekre kell reagálnia. Mivel a mért jel (sárga) előzetes mérések alapján 10-22 kHz-es komponenst tartalmaz, mint legmagasabb frekvenciájú komponens, ezért a mintavételezési frekvenciának ehhez kell igazodnia.



6. ábra, A mikrokontrollerbe beérkező jelek – Oszilloszkópos mérés

A mért értékek alapján megállapított mintavételezési frekvencia minimum 46 kHz. Ilyen jelet képes mintavételezni az ESP32 mikrokontroller. Az ebben lévő ADC legmagasabb

mintavételezési frekvenciája 200 kps [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 funkciós 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 esetben 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.

## 10.2 A sugárzást mérő eszköz

A sugárzás mérésére a már korábban bemutatott lehetséges megoldások közül egy szcintillátoros detektort fogok használni. Az optimális ár és pontosság elérésének érdekében egy 6x6x6mm méretű NaI(Tl) szcintillátort és egy Onsemi 60035 SiPM fotodiódát fogok használni. Ennek az összeállításnak a lényege, hogy sugárzás hatására a szcintillátor fény impulzust generál, és az alapesetben szigetelőként viselkedő dióda ennek hatására vezetőként fog működni. Ha ez az érzékelő páros sötét, fényt nem áteresztő tokozásban van, akkor csakis akkor fog vezetővé válni a dióda, ha a detektort sugárzás éri.

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 és a mért sugárzás minél alacsonyabb irányérzékenységéhez úgy kell megválasztani a detektor alkatrészeit, hogy az érzékeny felületek központosan szimmetrikusak legyenek. Ehhez legközelebbi forma, ami kereskedelembe kapható, az a kocka formájú szcintillátor. Ennél a formánál az elérhető legkisebb az irány érzékenység, valamint optikai illesztő anyagot használva, erre a formára könnyen ráilleszthető az általunk választott SiPM dióda. Ezen felül, mivel az előző évi műszerrel szemben jelen műszerben csak egyetlen dióda van, annak felületi kapacitása is jóval kisebb, tehát az érzékelt jel alakja is majd pontosabban behatárolható lesz.

Ezt a diódát záró irányba kötve, csak akkor fog vezetni az elektromos áramot, ha a dióda felületére a szcintillátorból fény érkezik. Ezt a fontos pillanatot fogjuk a későbbiekben mérni, detektálni.

## 10.3 A jelerősítő

Az SiPM diódából kijövő villamos jel nagysága kicsi, de meglehetősen nagyobb, mint az előző évben használt szimpla fotodiódás érzékelő. 5V-os előfeszítés esetén ez 18 mV<sub>pp</sub> (milli volt csúcstól csúcsig) körül van. Ahhoz, hogy ezt a jelet kellő pontossággal meg tudjuk mérni, továbbra is szükség lesz egy erősítőre, de ezúttal elegendő mindössze 5V-os tápfeszültség az erősítő fokozatnak is.

Az erősítés esetében 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. Mivel a tápfeszültség az erősítőhöz a korábbiakhoz képest megváltozott, így annak a paramétereit a későbbiekben méréssel kell majd igazolni, és ha szükséges, a kapcsoláson módosítani.

Az erősítő kapcsoláshoz 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 esetben igen fontos az alacsony feszültségű jel erősítéséhez.

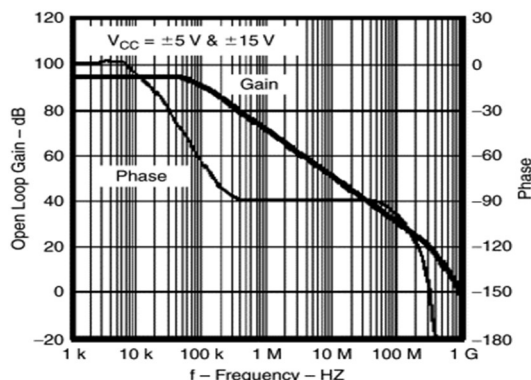
Minél alacsonyabb az erősítő által generált/erősített zaj szintje, annál alacsonyabbra fogom tudni állítani majd a komparálási feszültséget az alapjel felett, így várhatóan valamely nagyon kis energiájú sugárzást is detektálni leszek képes.

## 10.4 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 rögzítse a mért értékeket a mikrokontroller. Mivel a lehető leggyorsabb mintavételezéshez a mikrokontrollernek a teljes ciklusát a bejövő jel mérésére kell fordítania, így a jelszint vizsgálatát egy külső áramkör végzi el. 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 szükséges mintavételezési frekvencia 23kHz, 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.



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

## 11 A műszer felépítése

A műszer felépítése lebontható funkcionális elemeire:

- Tápellátás
  - Feszültség szintekre osztás
  - SiPM villamos megtáplálása és zajszűrés
  - Erősítési zajszűrés
- SiPM detektor
- Erősítő fokozatok
  - Előerősítő
  - Csatolás a kapcsolás többi részéhez
- Komparáló kapcsolás
- Csatlakozás a mikrokontrollerhez
- Mikrokontroller és jelfeldolgozó

### 11.1 Tápellátás

A műszerben két különböző feszültség szint van jelen. A műszer idei fejlesztésében a fő szempont az volt, hogy kisebb és hordozhatóbb legyen. Éppen ezért a tápellátás valamilyen szinten egyszerűsödött. Az előző három fajta feszültség szint helyett már csak kettő van: 5 és 3,3V. Ez azt jelenti, hogy már nem kell egy külön 9V-os táp vagy elem, mint korábban, hanem elég csak egy USB csatlakozó és maga a mikrokontroller.

Az SiPM és az erősítő fokozat előzetes tesztek alapján minden további nélkül működtek az USB által szolgáltatott 5V feszültséggel, viszont a későbbiekben a kalibráció során mérésrel is igazolni kell ezt arra az esetre, ha az erősítő nem a lehető legnagyobb jelszintet adja ki.

Ezen felül, az SiPM szempontjából is fontos a helyes feszültség. Az általam választott 60035 szenzor adatlapja szerint a letörési feszültség, (az a feszültség, ahol a dióda záró irányban is el kezd vezetni és tönkremegy) maximális javasolt értéke 5V. Tehát ezzel a módosítással a gyártó által javasolt értéket betartva van alkalmazva a szenzor.

Az áramkör számára az 5V-os alap feszültséget USB-n keresztül kapja az eszköz. Ez egyszerűvé teszi az eszköz megtáplálását, mivel egy univerzális kapcsolón keresztül történik az áram felvétel. Emellett, az USB csatlakozóhoz, jóval több opció van az áram szolgáltatásra. De ha mégis valamilyen külső akkumulátort használnánk, az eszköz áramfelvétele továbbra is előnyös, mindössze átlagosan 13mA, ha csak adatokat jelez ki és 100mA körüli, ha közben mér is.

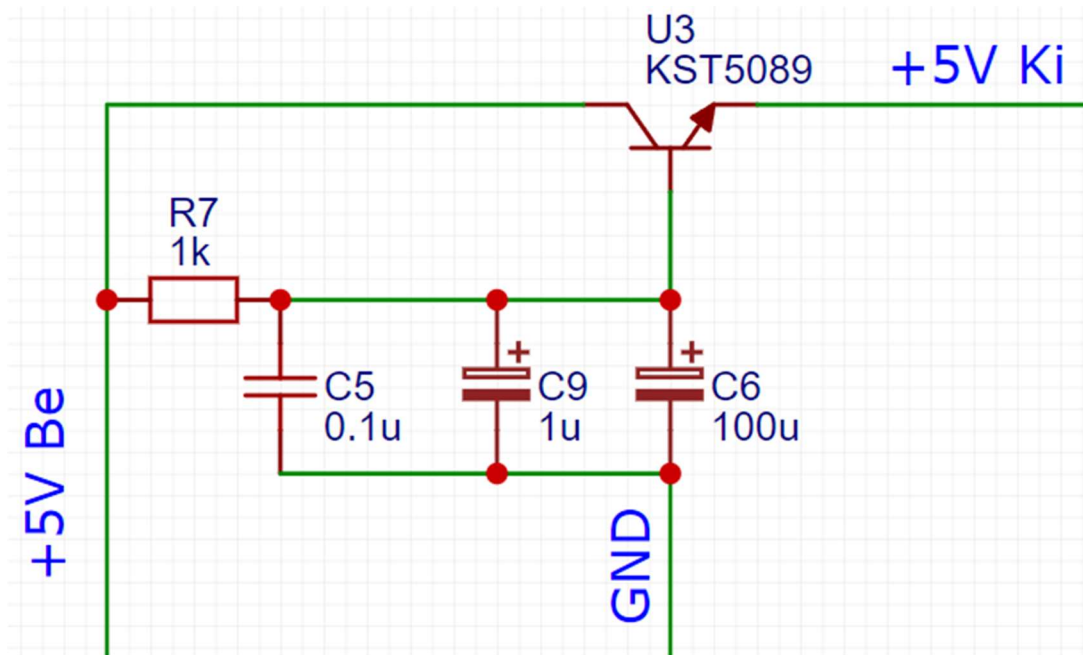
Elgondolva viszont, hogy a tápellátás szinte bármivel megoldható, így a megtáplálás zajmentesítése továbbra is fontos. Az előző évi műszernél a zaj forrása főleg a 9V-ot adó kapcsoló üzemi tápegység volt, és habár már nincs a kapcsoláshoz kötve kapcsoló üzemi tápegység, az USB-s megtáplálás során továbbra is felléphetnek hasonló zajok. Tehát felhasználva a tavalyi kapcsolást, idén is egy kapacitás többszörözőt használok a kapcsolásban, habár idén már SMD formában.

Ennek a zajszűrőnek a 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 [ $\Omega$ ]
- $C$ : Eredő kapacitás [F]



8. 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 csúcsról csúcsig tartó feszültsége 3 mV. Ez egy stabil, zavarmentes tápfeszültség.

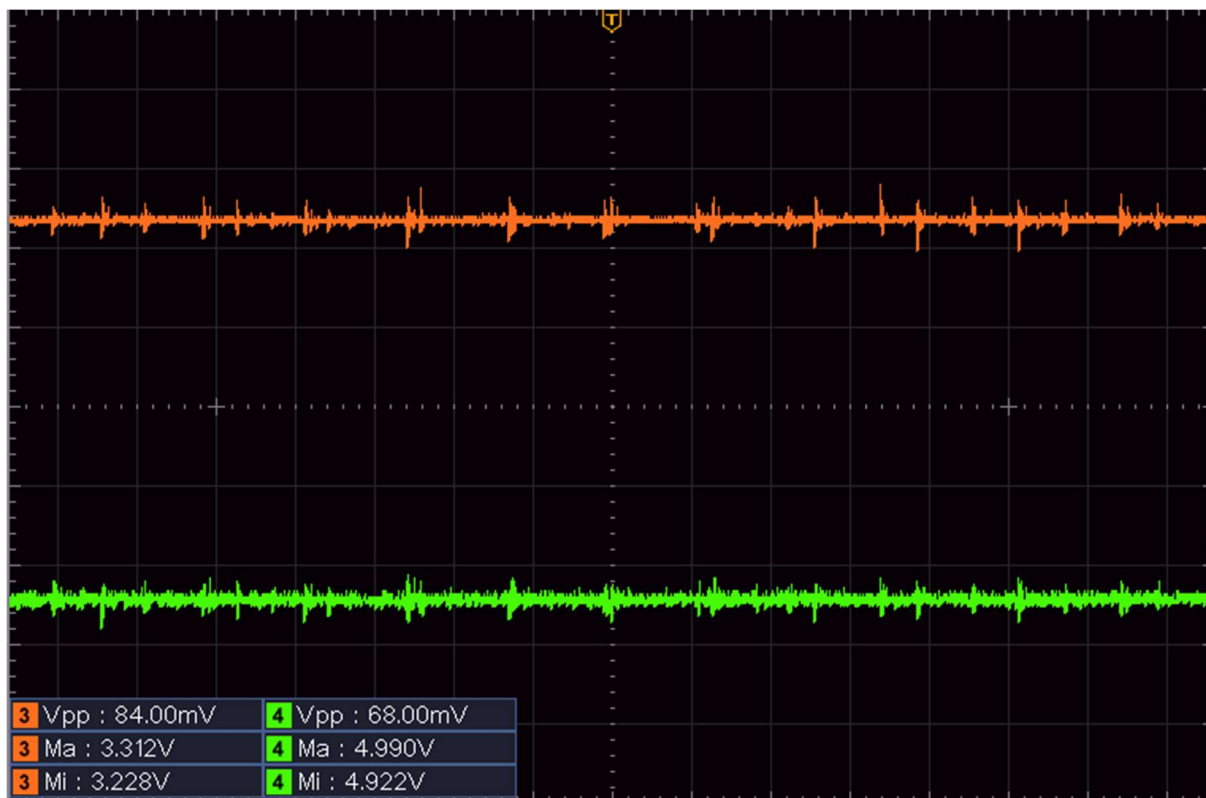
A mikrokontrollernek és a komparáló kapcsolásnak szükséges 3,3 V-os feszültséget egy a mikrokontrollerbe épített LDO feszültségszabályzó szolgáltatja. A mikrokontroller USB-n keresztül folyamatos 5V-ot kap, és az egyik kimenetén az LDO által előállított 3,3V-al táplálja meg a további részeit a kapcsolásnak.

Az áramkör idei verziójában a komparátor a 3,3V-os tápot használja. Mivel a mikrokontroller 3.3V-os jelszintet használ, így a komparátor is ehhez a feszültség szinthez mérten működik majd.

Végül, az OLED kijelző, amin az adatok fognak megjelenni, az 5V-os tápot használja. Mivel a kijelzőn van feszültség szint szabályzás, valamint jelszint limitálás, ezért 5 és 3,3V között bármilyen tápfeszültséget és jelszintet elfogad. Ez tovább egyszerűsíti a kellő áramkört.

Az eszköz számára az 5V-os USB feszültséget legtöbb forrás kapcsolóüzemű tápegység segítségével állítja elő. Ezeknek a mellékhatása a lehetséges zaj faktor. A jelek zajtartalmának csökkentésére szűrőkondenzátorokat alkalmazok mind a 3,3 V-os és 5 V-os részekén. Ezek alkalmazásával a feszültség hullámszín, az az a feszültségek csúcsról csúcsig tartó feszültségértéke megfelelően alacsony. Lásd az alábbi ábrát! Viszont mivel a műszer ezen verziója már nem egy fém árnyékolású dobozban lesz, hanem egy 3D nyomtatott dobozban, ezért a zaj csökkentés még inkább fontos, mint a műszer tavalyi verziójában. Éppen ezért a használt mikrokontroller verzió is más. Eddig az „ESP Wroom 32” nevű fejlesztői áramkört alkalmaztam, aminek a 3,3V-os feszültség szabályzója egy régebbi dizájnt követett. Viszont az új műszeremben használt „ESP 32 Wrover-E” fejlesztői áramkör egy jobb minőségű LDO szabályzót és egy hatékonyabb kondenzátoros zajsűrőt használ. Ez egy jobb kimeneti zajszintet biztosít, ezzel is növelve a műszer pontosságát.

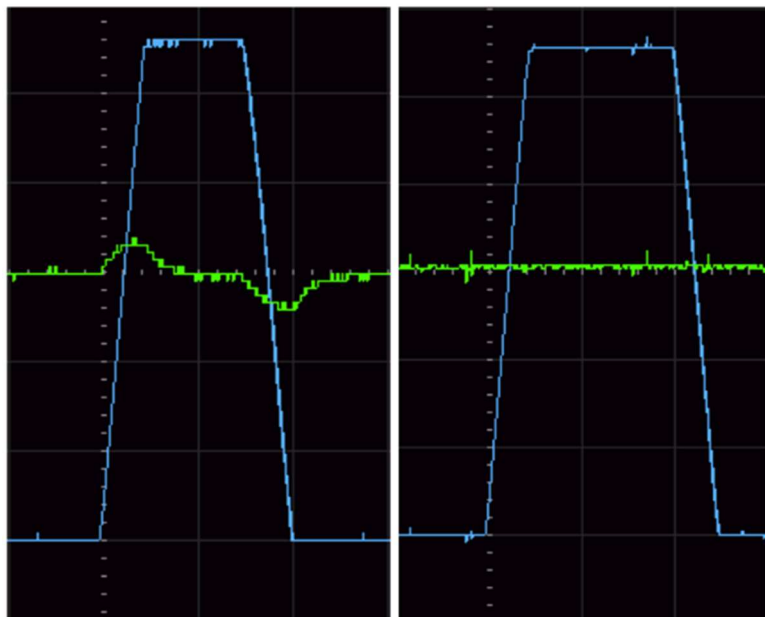
Esetünkben a kondenzátorok a diagramon látható mértékig csökkentették a táp kapcsolási zaját. 5V-os tápbemenet esetén 68 mV mérhető, és a 3,3 V-os táp esetén a tavalyi kapcsolásnál tapasztalt 256 mV-ot 84 mV-ra csökkentette. Ez is mutatja, hogy a mikrokontroller újabb verziója tényleg segít a zajcsökkentésben. 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.



9. 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.

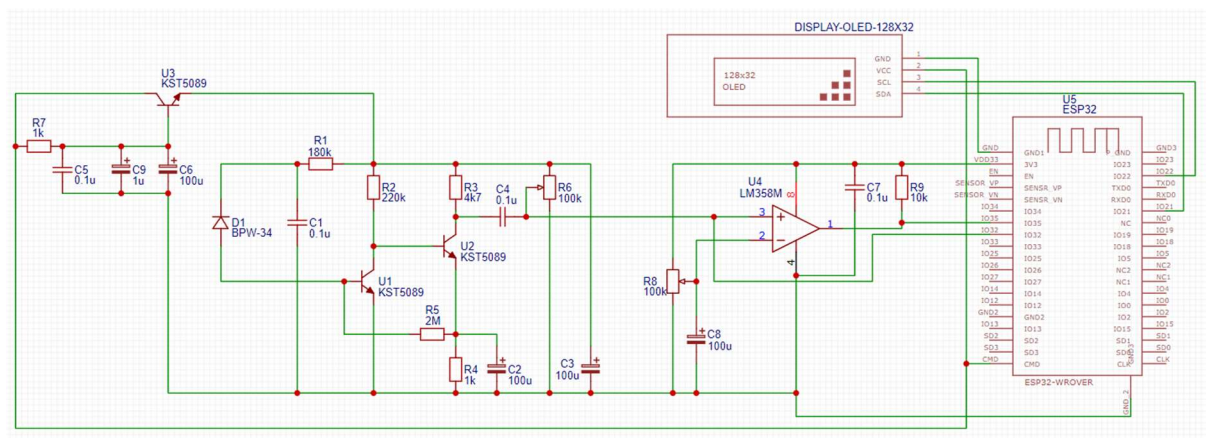


10. ábra, komparátor befolyása a referencia feszültségre kondenzátor nélkül és kondenzátorral - Oszilloszkópos mérés

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 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.

## 12 A műszer kapcsolása

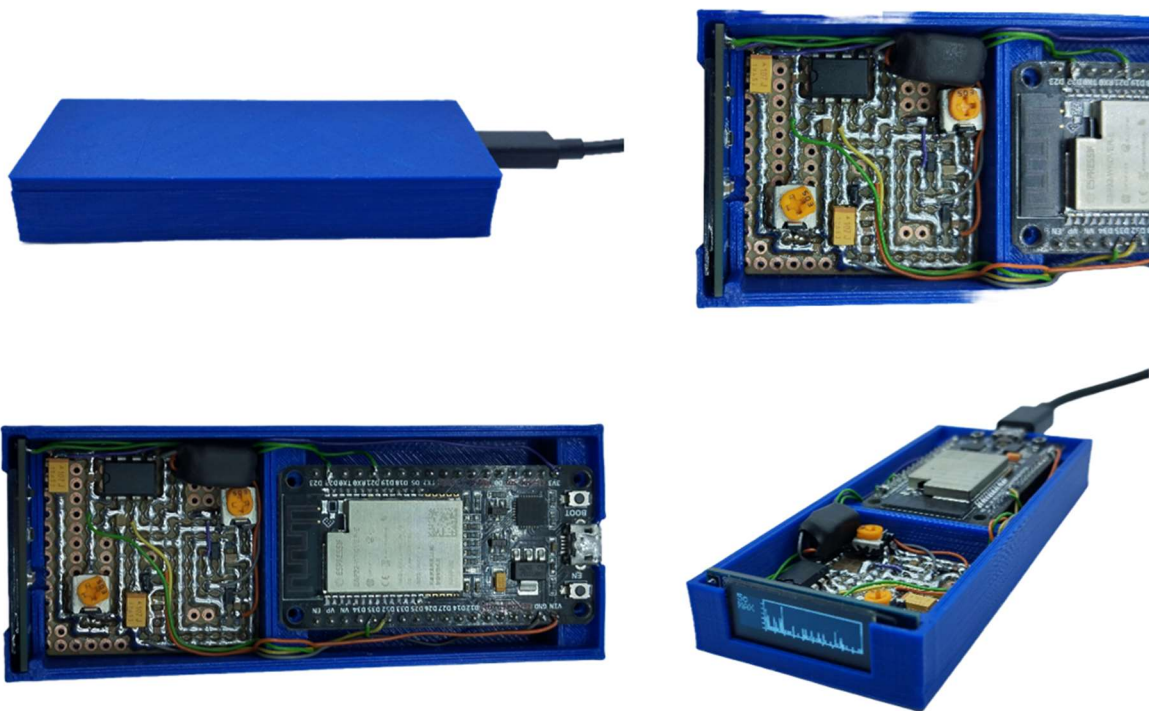
Az előző részben bemutatott részegységek az alábbi módon kapcsolódnak össze teljes áramkörre.



11. ábra, A műszer alap kapcsolása a követelmények alapján

Az egyes részek megépítése idén is hasonlóan egyszerű volt, mint az előző verziónál. Az egyes alkatrészeket egyetlen kis méretű lyukacsos próbapanelre forrasztottam fel, majd a panelon elhelyezett kivezetéseket kábellel kötöttem bele a mikrokontrollerbe. Mivel az idei műszernél kiemelten fontos a méret, ezért úgy döntöttem, hogy ezúttal SMD alkatrészeket használok. Minden a kapcsolásban szereplő alkatrész elérhető SMD formában és a lyukacsos panel forrasz pontjainak távolsága ideális az ilyen alkatrészekkel való dolgozásra. Ez nem csak lekicsinyítette a kapcsolás méretét, de a külső elektromos zajok sem okoznak akkora problémát a méret miatt. Ez azt jelentette, hogy az áramkör már nem igényelt egy árnyékolt fém házat, mint a korábbi verziónál. Éppen ez tette lehetővé a ház egyszerű 3D nyomtatóval való elkészítését. Ez nem csak gyors és egyszerű, de fejlesztés során flexibilis módot biztosított az eszköz megépítésére.

Az eszköz megépítésénél a végén mindössze négy külső alkatrész maradt amit az eszköz házába bele kellett építeni. Az általam készített erősítő-komparáló áramkör, a szcintillátor-SiPM detektor, az OLED kijelző, valamint maga a mikrokontroller. Ez a felépítési mód minimalizálta a kábelek mennyiségét, valamint a méretet is lekicsinyítette a korábbiakhoz képest. Nincs semmilyen külső csatlakozó, lógó kábel vagy mozgó alkatrész.



12. ábra, A megépített mérőműszer részei

### 13 A műszer szoftvere

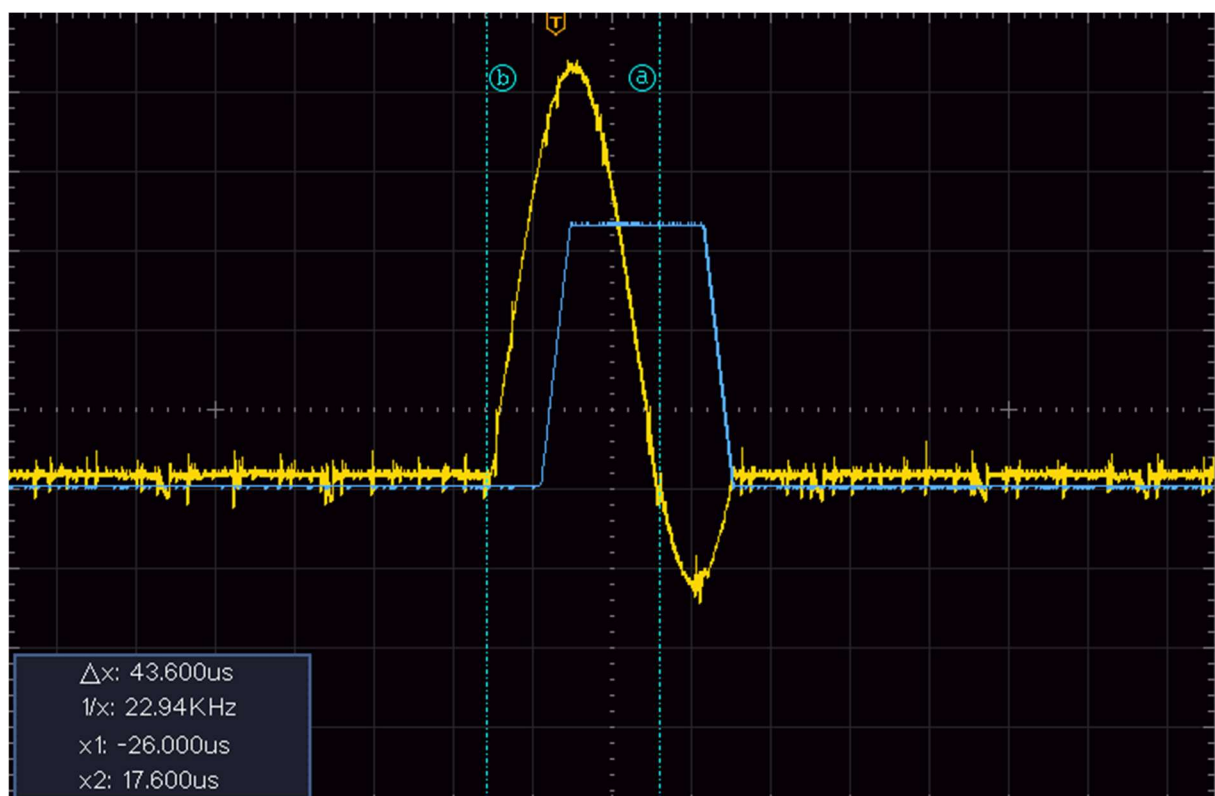
A műszer feldolgozó egysége egy ESP32 fejlesztői eszköz. Ezt az Arduino IDE szoftver segítségével tudjuk programozni.

A műszer szoftverének két fő funkciója van. Regisztrálja a bejövő jeleket és eltárolja azt, valamint, hogy a beérkezett jeleket feldolgozza és azt egy spektrummá 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 OLED kijelző 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 detektorból érkező analóg jel jelenik meg.

A bejövő jeleket ez az ábra mutatja:



13. 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 potenciométerrel beállított feszültség szintet, akkor a jel 3,3V-ra megy fel.

Az ESP32 maximális mintavételezési sebessége 200kps abban az esetben, ha 120MHz-es óra jelet használunk, tehát a mintavételezési sebesség megfelelően gyors a kapott, esetünkben ~23kHz-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 képen kell beállítani:

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

Ezzel a paranccsal az ADC1 átalakító 1-es portjának 1-es bemenetét DAC módra állítottuk és mintavételezési frekvenciáját 640.000 bit per másodpercre állítottuk. Mindezt 16 bites mért és 12 bites transzformált felbontással, tehát 137kps 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 kijelző egyszerre meg tud jeleníteni. Mivel az általam használni kívánt OLED kijelző 128 pixel széles, amiből 100 pixel széles lesz majd a diagram, ezért a maximum tömb méret 100 lesz, ami, habár kisebb, mint a tavalyi műszer által használt 500, mint az korábban kiderült, a spektrumba keveredett zaj miatt, az 500 db-os tömb nem segít a spektrum kiolvasásában, így viszont a mikrokontrollernek kevesebb számítást kell végeznie egyes jelek között. 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 < 100; i++) {  
>>     values[i] = I2S.read();  
>>   }  
>> }
```

Minden egyes körben 100 mérést végzünk, és mindig a sorban legelsőnek mért értéket írjuk át. Ezzel azt érjük el, hogy a tömb mindig a legutolsó 100db 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 fogja a mikrokontroller 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 100-ig terjedő skálán. Ennek a skálának a mérete szintén a megjelenítő felület képességeitől függ, amely esetemben továbbra is 100 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 át transzformálni.
- $X_{be}$ : 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 jeltüskék ezen felüliek, maximális érték pedig az ADC által mért maximális értéke, a tápfeszültség értéke lesz, azaz 4095. Ezt a tartományt szeretném transzformálni a kijelző program skálájára, 0 és 100 közé.

Ha megkaptuk a transzformált értéket, akkor azt a már létrehozott, spektrumot tároló tömbbe rakom bele. Minden egyes értéknek 0-tól 100-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 transzformálok, a transzformált értéket a „spectrum” nevű tömbbe feljegyzem, majd hangjelzést adok, a felhasználónak a beérkezett jelről.

Az USB-n keresztül a korábbi verzióhoz hasonlóan UART csatlakozást használ az eszköz. Ennek segítségével bármely ilyen célra szánt konzol programmal ki tudom jelezni a mért és feldolgozott adatokat, amennyiben a beépített kijelző nem lenne elég. 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.

Ahogy korábban viszont említettem már, az adatok elsődleges kijelzési helye az a beépített OLED kijelző lesz. Ez egy 0,98” méretű I2C vezérelt kijelző, aminek rendkívül alacsony fogyasztása és egyszerű digitális vezérlése miatt ideális kijelző eszköz. Még inkább, mivel az Arduino IDE közösség több elérhető könyvtárát is készített ehhez a kijelzőhöz, így nem kell tudnunk, hogy miként kell kommunikálni a kijelzővel. Csupán az egyszerű módosító parancsokat kell tudnunk.

A kijelzőt a következő parancsokkal kell elindítanunk.

```
>> display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, SCREEN_ADDRESS);
>> display.clearDisplay();
>> display.setTextCursor(SSD1306_WHITE);
```

Először a display.begin paranccsal definiálom, hogy a kijelző beépített vezérlője az SSD1306-os, és a könyvtár által tárolt alap I2C címen fog a mikrokontroller kommunikálni. Ezen felül törölni kell a kijelző tartalmát a clearDisplay paranccsal, így, ha bármi random bit lenne a kijelző memóriájában, így azt ki tudjuk törölni. És végül, ahhoz, hogy a program által átküldött parancsok a kijelzőn fehér színnel jelenjenek meg, a setTextCursor parancs beállítja a fehér színt a használt színnek.

A továbbiakban, ha valamit meg szeretnénk jeleníteni a kijelzőn, akkor az alábbi parancsokat tudjuk használni.

```
>> display.drawPixel(x, y, color);
>> display.print(string);
>> display.setCursor(x, y);
```

A drawPixel parancs az x,y kordinátán lévő pixelt felkapcsolja a definiált színnel, a print parancs a megadott szöveget írja ki a kijelzőre, és végül a setCursor parancs a kurzor helyét mozgatja, aminek segítségével x,y koordinátára tudunk írni. Ez a három alap parancs segítségével tudunk kirajzolni minden a megfelelő helyre a kijelzőn.

Ezen felül, amikor a kirajzolás meg van, a következő paranccsal lehet a kijelzőnek átküldeni a tárolt kijelző képet, hogy a felhasználó számára is látható legyen.

```
>> display.display();
```

Mindezeket a részeket összefűzve a műszer képes a bejövő jelek mintavételezésére, a trigger jel változásainak érzékelésére, a mért adatok feldolgozására és végül, de nem utolsó sorban a feldolgozott adatok kijelzésére kijelzőn vagy soros porton keresztül.

## 14 A műszer kalibrálása

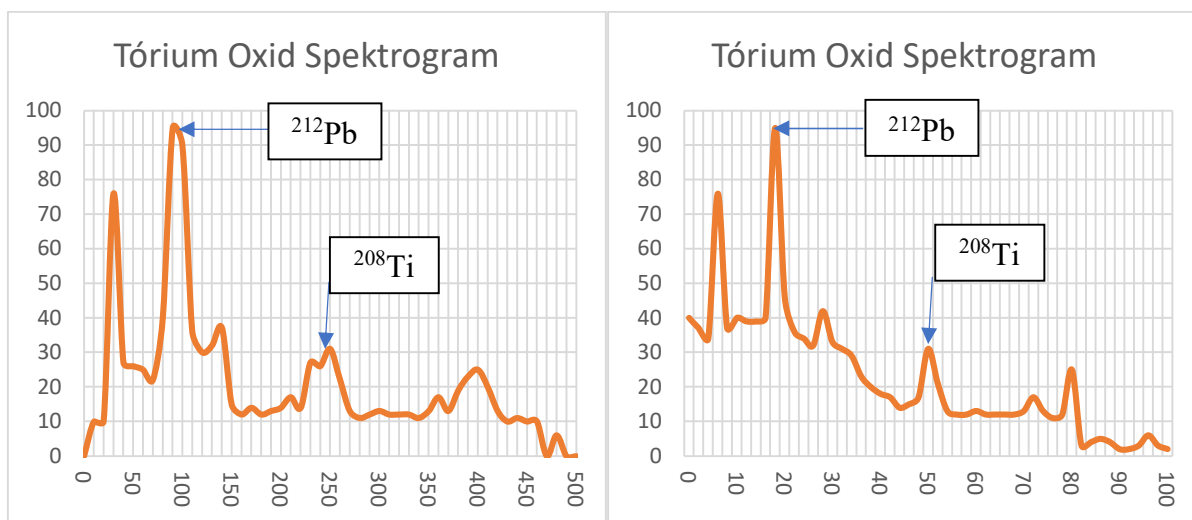
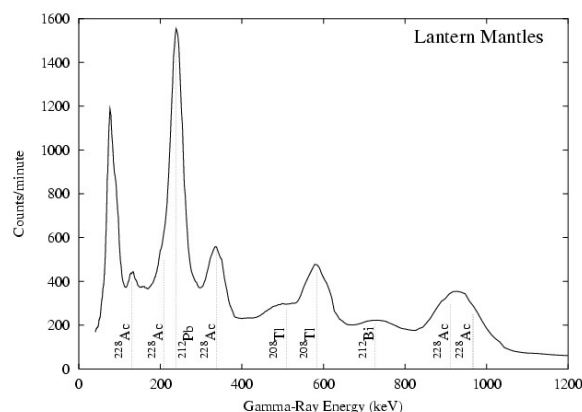
A műszer kalibrálását egy ismert forrással tudom elvégezni. Amennyiben ismerjük a sugárzó anyagot, amit mérni próbálunk, akkor a mért értékeket úgy tudjuk utólag korrigálni, hogy a várt spektrumot kapjuk. Ezt a korrekciós értéket az összes értékre használhatom majd a jövőben, mivel a beérkező sugárzás 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.

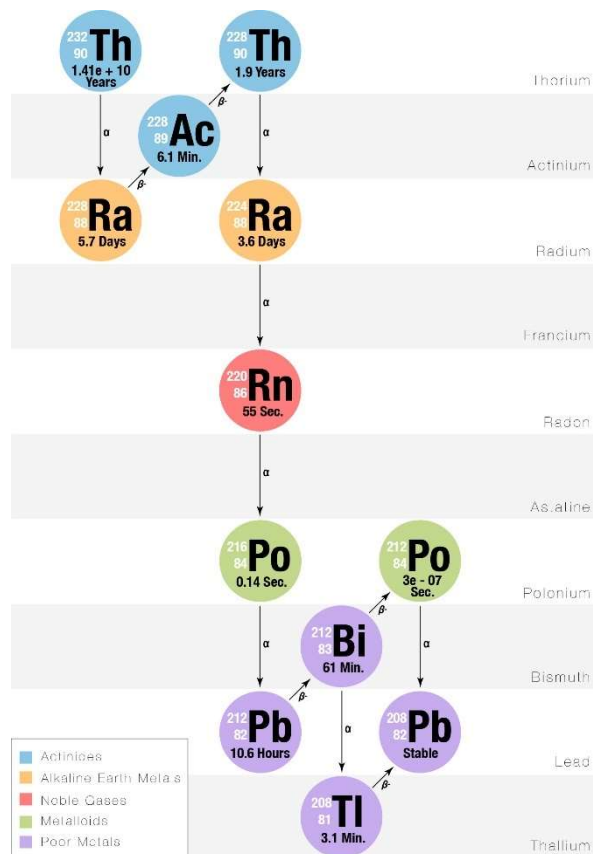
A kalibrálást az adott anyag bomlási láncában található anyagok alapján végzem. Ebben az esetben a legnagyobb számban jelen lévő anyag a  $^{212}\text{Pb}$ , ezért ez a legpontosabban kivehető. Első lépésben ennek az anyagnak a helyét fogjuk igazítani a spektrumon.

Mivel az előző évben épített műszeremmel is elvégeztem ezt a fajta kalibrációs mérést, ezért itt a lehetőség, hogy összehasonlítsam a két külön fajta műszer által mért értékeket, és megmutassam, hogy az idén épített műszer mennyivel jobb, mint egy egyszerű PIN diódás detektor. Annak érdekében, hogy összehasonlítható legyen a két mért spektrum, a mért sugár forrás ugyan az, mint a tavalyi műszer által mért minta, tehát az egyetlen változó a műszer maga.



14. ábra, Fönt: tórium oxidos szövet mások által mért spektruma és a két saját műszer által mért spektrum bal oldalt a korábbi PIN diódás detektor, jobb oldalon pedig az új SiPM detektoros mérés [17]

A két ábrát összehasonlítva látható, hogy a két mérés eredménye ugyan azt mutatja, viszont az is észrevehető, hogy bár a tüskék helye megegyezik, a mért értékekben kevesebb a szórás és így a részletek is jobban láthatóak. Megfigyelhető, hogy az egyes tüskék jóval hegyesebbek, ami azt eredményezi, hogy a későbbiekben a mérendő anyagok energiáját pontosabban meg tudjuk állapítani a spektrum alapján. Ezek az előnyei az új SiPM detektornak.



15. ábra, Tórium bomlási sora [26]

A kalibrációs mérést ezúttal 6 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  $^{212}\text{Pb}$  domináns energiája 238keV [18], ezért a mért skálán az itt megjelenő legnagyobb tüske energia értéke tekinthető 238keV-nak. Ahhoz, hogy a skála léptéket megállapíthassam, egy második tüskének a helyét is meg kell állapítani. Ehhez a  $^{208}\text{Tl}$  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.

## 15 Elemi részecskék és ellentettjeik

Most, hogy a műszer működőképes állapotban van, és kalibrálva is lett, tudnunk kell mit is szeretnénk pontosan mérni. Amit ebben a dolgozatban el szeretnénk érni a műszerrel, hogy antianyagot lehessen mérni otthon található ételekben. De mi is az az antianyag?

Az atomfizikában alapvető részecskék és az azok közötti interakciók segítségével lehet felépíteni anyagokat, és megmagyarázni a köztük lezajló folyamatokat. Viszont amit sokan nem tudnak, hogy minden alap részecskének van egy fordított változata is, ami a hordozott töltéstől eltekintve ugyan olyan tulajdonságokkal rendelkezik, mint az általunk többnyire megfigyelt normál fajtája. Ezeket a fordított anyagokat, antianyagnak nevezzük. Az alábbi táblázatban ezeket az anyagokat és párjaikat láthatjuk.

| Standard Model of Elementary Particles                           |                                                                  |                                                                   |                                                                  |                                                                   |                                                                    | interactions / force carriers<br>(elementary bosons) |                                              |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| three generations of matter<br>(elementary fermions)             |                                                                  |                                                                   | three generations of antimatter<br>(elementary antifermions)     |                                                                   |                                                                    |                                                      |                                              |
| I                                                                | II                                                               | III                                                               | I                                                                | II                                                                | III                                                                |                                                      |                                              |
| mass<br>charge<br>spin                                           |                                                                  |                                                                   |                                                                  |                                                                   |                                                                    |                                                      |                                              |
| $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$<br>$\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$  | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$<br>$\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$<br>$\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$<br>$-\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$<br>$-\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$<br>$-\frac{2}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | 0<br>0<br>1                                          | $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$<br>0<br>0   |
| <b>u</b><br>up                                                   | <b>c</b><br>charm                                                | <b>t</b><br>top                                                   | <b><math>\bar{u}</math></b><br>antiup                            | <b><math>\bar{c}</math></b><br>anticharm                          | <b><math>\bar{t}</math></b><br>antitop                             | <b>g</b><br>gluon                                    | <b>H</b><br>higgs                            |
| $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$  | $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$<br>$\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$  | $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$<br>$\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$    | $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$<br>$\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$   | 0<br>0<br>1                                          |                                              |
| <b>d</b><br>down                                                 | <b>s</b><br>strange                                              | <b>b</b><br>bottom                                                | <b><math>\bar{d}</math></b><br>antidown                          | <b><math>\bar{s}</math></b><br>antistrange                        | <b><math>\bar{b}</math></b><br>antibottom                          | <b><math>\gamma</math></b><br>photon                 |                                              |
| $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$<br>-1<br>$\frac{1}{2}$           | $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$<br>-1<br>$\frac{1}{2}$          | $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$<br>-1<br>$\frac{1}{2}$           | $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$<br>1<br>$\frac{1}{2}$            | $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$<br>1<br>$\frac{1}{2}$            | $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$<br>1<br>$\frac{1}{2}$             | 0<br>1<br>1                                          | $\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$<br>0<br>1    |
| <b>e</b><br>electron                                             | <b><math>\mu</math></b><br>muon                                  | <b><math>\tau</math></b><br>tau                                   | <b><math>e^+</math></b><br>positron                              | <b><math>\bar{\mu}</math></b><br>antimuon                         | <b><math>\bar{\tau}</math></b><br>antitau                          | <b>Z</b><br>Z <sup>0</sup> boson                     |                                              |
| $< 2.2 \text{ eV}/c^2$<br>0<br>$\frac{1}{2}$                     | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$<br>0<br>$\frac{1}{2}$                   | $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$<br>0<br>$\frac{1}{2}$                    | $< 2.2 \text{ eV}/c^2$<br>0<br>$\frac{1}{2}$                     | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$<br>0<br>$\frac{1}{2}$                    | $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$<br>0<br>$\frac{1}{2}$                     | 1<br>1<br>1                                          | $\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$<br>1<br>1    |
| <b><math>\nu_e</math></b><br>electron neutrino                   | <b><math>\nu_\mu</math></b><br>muon neutrino                     | <b><math>\nu_\tau</math></b><br>tau neutrino                      | <b><math>\bar{\nu}_e</math></b><br>electron antineutrino         | <b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b><br>muon antineutrino            | <b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b><br>tau antineutrino             | <b>W<sup>+</sup></b><br>W <sup>+</sup> boson         | <b>W<sup>-</sup></b><br>W <sup>-</sup> boson |

16. ábra, Alap részecskék táblázata (anyag és antianyag) [19]

A később általunk vizsgált részecske az elektron lesz. Ha ezt vesszük például, látható, hogy az elektronnak egyszerűen negatív töltése van. Antianyag formában egy elektronnak (vagy ahogy azt hívjuk, pozitronnak) egyszerűen pozitív töltése van. Ha megnézzük a táblázatban lévő többi részecskét is, látható, hogy azok között is csak a töltés polaritása változik anyag és antianyag között. Professzionális kísérletek során ezt a tulajdonságot használják, hogy megkülönböztessék őket egymástól, mivel reakció képességükben, valamint a reakciók folyamataiban, és egymás közti interakciójukban a két oldal teljesen megegyezik.

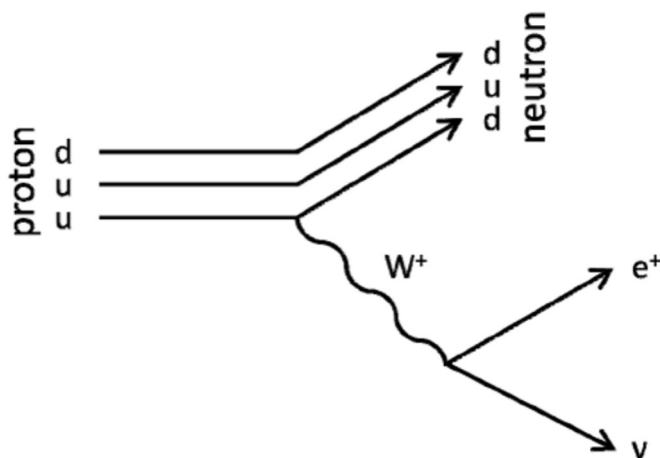
Példaként, ha létrejön egy elektron, amit két ellentétes elektromos töltésű (pozitív és negatív) lemez között vezetünk át, az a pozitívan töltött lemez fele fog vonzódni, míg, ha elektron helyett pozitront hozunk létre, akkor az ugyan ebben a helyzetben a negatívan töltött lemez felé fog vonzódni. És bár ez elég egyszerűnek hangzik, legtöbb esetben a nehézséget nem is ez, hanem az antianyag előállítása, valamint annak sértetlenségének megőrzése jelenti. Ugyanis az anyag és antianyag találkozásánál a részecskék vagy szétbomlanak, vagy megsemmisülnek, tehát látható, hogy az antianyag megőrzése meglehetősen nehéz dolog.

Mivel kutatásaim során nem tudtam építeni olyan eszközt, ami meg tudja különböztetni az anyagot és az antianyagot, ezért a professzionális módon elvégzett kísérletek eredményeit és leírásait tudom alapul venni, hogy később a méréseimet igazoljam elméleti úton.

## 16 Bomlási folyamatok sugárzó anyagokban

Ahogy a kalibrációról szóló fejezetben is említettem, minden sugárzó anyagnak meg van egy határozott bomlási lánc. Ez azt mondja meg, hogy egy anyag miként bomlik szét idővel más anyagokká. Viszont ez nem mindig csak egy féle módon történhet. Ha az elemi részecskék közötti folyamatokat vesszük alapul, akkor minden anyag között megállapíthatóak bomlási folyamatok. Ezeket a folyamatokat ábrázolhatjuk Feynman diagrammok segítségével, ezzel is átláthatóbbá téve a folyamatot.

Vegyünk példaként egy egyszerű protont. A proton az egy kvarkokból álló részecske, ami az atomok magjában található. Egy proton két fel (up) és egy le (down) kvarkból áll. Ha valamilyen hatás következtében egy proton felbomlik, akkor a proton részecskéi a következő módon bomolhatnak szét.



17. ábra, Proton bomlása [20]

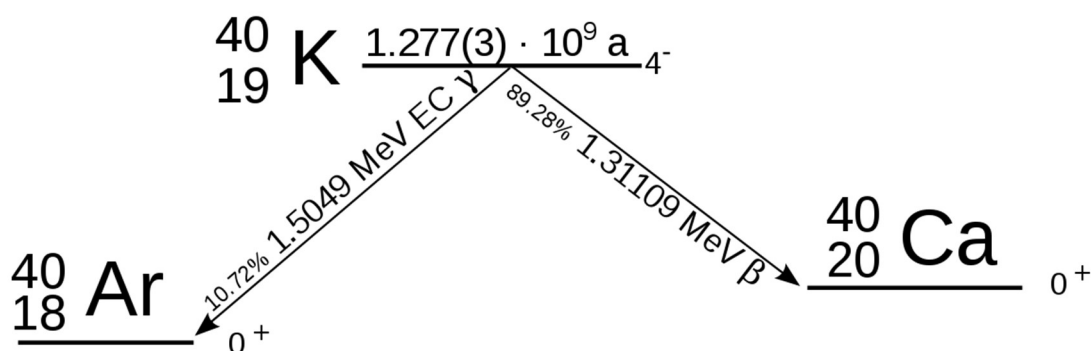
A proton két fel és egy le kvarkja energia leadással (ez esetben gamma sugárzással) átalakul két le és egy fel kvarkká, és a leadott energia egy weak bosons interakcióval létrehozhat egy pozitront és egy elektron neutrínót. Viszont ez nem egészen teljes. Egy elektront véve példaként, ha a bomlás során felszabaduló energia meghaladja egy elektron tömegének kétszeresét, csak akkor jön létre pozitron, valamint egy elektron. Minden esetben egyszerre egy pár jön létre, amiből a pozitron rövidesen reagálni fog más környező anyagokkal, az elektron viszont szabadon megy tovább míg más részecskébe nem ütközik. Tehát látható, hogy ha a bomlás során létrejött elektront érzékelni tudjuk, akkor tudhatjuk, hogy a folyamat során egy pozitron is létrejött.

Hasonló ábrákkal lehet leírni komplex anyagok bomlását is, mint például egy egész atom bomlását. Minden esetben vagy direkt átalakulás történik, ahol a bomlásból felszabaduló energia kisugárzásra kerül, vagy valamilyen bosons erőn keresztül további részecskék jönnek létre. Jelen dolgozatban tervezett kísérletemben is egy anyagot létrehozó bomlási folyamatot vizsgálók majd.

## 17 Antianyag detektálásának folyamata

Sok ember számára nem evidens, de a környezetünkben elég sok olyan anyag van, aminek a bomlása folyamán egyszerűen mérhető sugárzás szabadul fel. Ezeknek egy kis része okozza a mindenhol megtalálható háttérsugárzást is. Viszont ebben a kísérletben nem a háttérsugárzást fogom mérni, hanem egy bizonyos anyag bomlási folyamatát. Ez az anyag a kálium, pontosabban a kálium egyik izotópja, a kálium 40. Ez az anyag a legtöbb ételben megtalálható fém, amelynek sugárzó tulajdonsága van. Instabil anyagról lévén szó, az anyag külső behatás nélkül bomlik le és felezési ideje alatt bekövetkező bomlási folyamatból felszabaduló sugárzás mérhető. Viszont ahhoz, hogy tudjuk mit keresünk, tudnunk kell, hogy mit mérünk.

A már korábban bemutatott bomlási diagram segítségével a kálium bomlási folyamata is leírható. [21]



18. ábra, A kálium 40 lehetséges bomlási folyamatai [21]

Ezen a diagrammon látható, hogy egy kálium 40-es izotópja alapvetően két módon bomolhat le. Az esetek többségében kalcium 40 a bomlási anyag, amely esetben béta bomlás megy végbe, valamint az esetek többi részében argon 40 lesz belőle, ami pedig egy gamma kisugárzást eredményez. Ahogy azt már korábban bemutattam, a béta sugárzás során az atomból egy béta részecske lökődik ki, tehát a felszabaduló energia annak a részecskének a kinetikus energiájában fog megnyilvánulni. Viszont abban az esetben, amikor argon a bomlásból származó anyag, a folyamat során egy nagy energiájú gamma sugárzás formájában adja le a kálium az energiát, és ez a sugárzás fajta más atomokat eltalálva bomlásra készítheti azokat. Ez történik jelen kísérletben is.

A bomlási folyamatban keletkező gamma sugárzás, ha eltalál egy protont, akkor a korábbiakban bemutatott módon szétbomlik kvarkokra, és a bomlási folyamat során felszabaduló energia egy része egy pár elektront és pozitront hoz létre. Ez azért lehetséges, mert a kálium bomlása során a kisugárzott gamma sugárzás energiája meghaladja egy pár elektron energiáját, ami összesen  $1 \text{ MeV}$ . Ahogy korábban említettem a pozitron rövid időn belül lebomlik amikor a környezetben lévő anyagokkal reagál, de az elektront mérhetjük eszközünkkel. Tehát, ha egy szabad elektront tudunk észlelni, akkor tudhatjuk, hogy a folyamat során egy ponton antianyag is keletkezett.

## 17.1 A mérés felépítése

Most, hogy már tudjuk mit mérünk, a mérés felépítése a következő lesz. A méréshez kelleni fog egy kálium forrás, aminek a bomlási folyamatát fogjuk érzékelni, valamint kelleni fog maga a mérő eszköz. A mérő eszközt viszont az adatok rögzítése céljából egy számítógéphez fogom kötni, így UART kommunikáción keresztül rögzíteni tudom a mért adatokat.

A mérendő anyagnak kálium kloridot választottam, mivel tisztítószerként könnyen beszerezhető, és a kálium tartalma igen magas a háztartásban található többi anyaghoz képest. Ebből 5 darab egy kilós csomagot használva körbe raktam a műszert, így a lehető legnagyobb esély van a bomlási termékek érzékelésére.

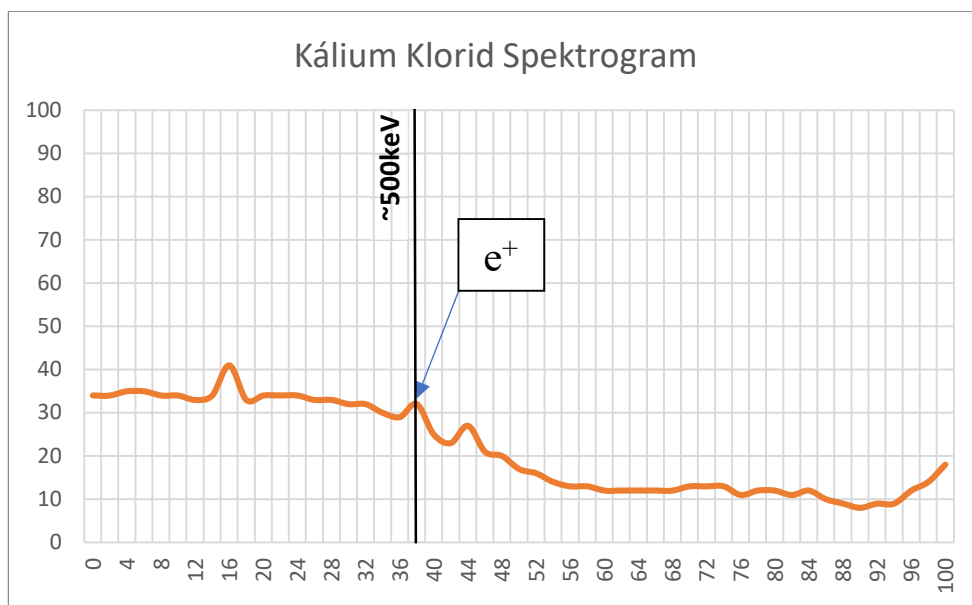
Mivel a kálium 40 az esetek körül belül egy százalékában bomlik le pozitron kibocsátásával, és amiért az eszköz érzékelője mindössze 6x6x6mm méretű, ezért a spektrum elkészítésének a folyamata igen lassú, valamint az érzékelni kívánt elektronok könnyen elveszhetnek a háttérsugárzás zajában. Azért, hogy ezen javítsak, a méréseket egy ház beton pincéjében éjszaka végeztem, azért, hogy a lehető legkisebb háttérsugárzást gyűjtse össze az eszköz, viszont ennek ellenére a nem a mérésben használt káliumból származó jelek határozottan problémát jelentettek. Ideális esetben egy nagy sűrűségű anyaggal, mint például ólommal lehet leárnyékolni a mérést, viszont egy ekkora méretű kísérletnél ez igen költséges és nem is elengedhetetlen.

## 17.2 A mérés folyamata

Amint a mérés felállítása megtörtént, neki kezdtem a mérésnek, amelynek folyamata a következő:

A mérést minden egyes alkalommal napnyugta után fél órával kezdtem, és minden alkalommal összesen 8 órát futott a mérés. Az adatok átlagolása szempontjából a felállást háromszor ismételt meg, így kiküszöbölhető minden olyan zaj és kíváncsi tényező, amely befolyásolná a mérést.

A spektrumokat mind a három alkalommal számítógépre mentettem, majd a végeredményeket Excel segítségével ábrázoltam. A mérések végeztével, a három mérésből származó adatokat összesítve átlagoltam, amiből a következő diagram jött ki.



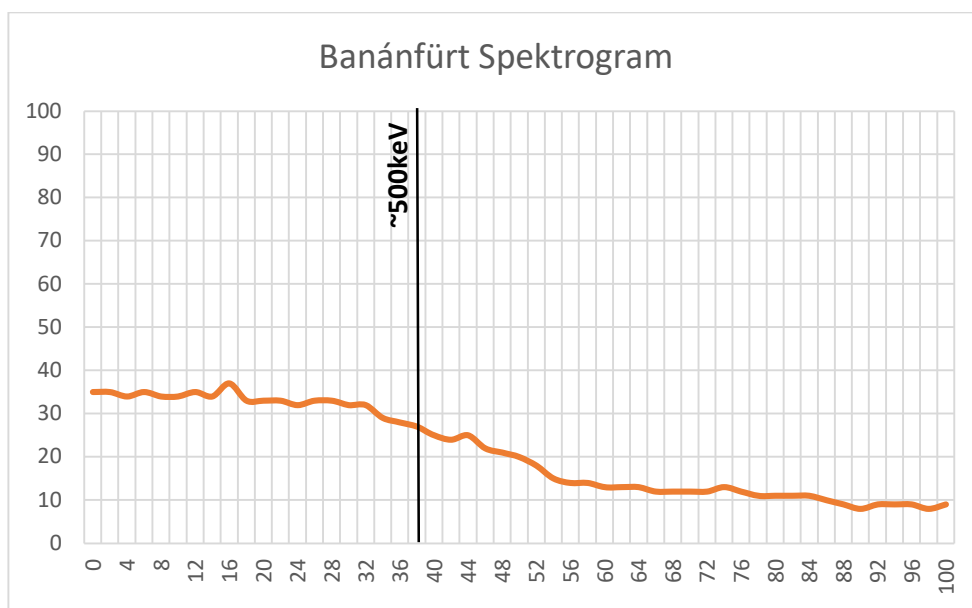
19. ábra, a mérésben szereplő Kálium 40 tartalmú Kálium Klorid só spektrogramja

Ahogy látható a spektrogrammon, a detektált elektronok mennyisége igen csekély és szinte teljesen elveszik a zajban. De mivel a kalibrálás segítségével tudjuk, hogy a spektrumnak a vízszintes tengelyen az osztásai milyen energia szinteket jelölnek, ezért pontosan tudható, hogy melyik pontban látható a mért elektronok csúcsa és zajsztint közelében is meg tudjuk állapítani, hogy érzékelhető-e vagy sem. Viszont azt, hogy ez az érzékelt elektron csúcs tényleg antianyag jelenlétét jelzi, azt csakis elméleti úton tudom jelen esetben alátámasztani, mivel az anyag és az antianyag közti különbséget szofisztikáltabb eszközökkel lehet csak megmondani.

## 18 Antianyag detektálása egy banánban

Az előző mérés során több kilónyi káliumban dús sót használtam, viszont mi van azokkal az ételekkel, ami szintén tartalmaz káliumot? Azokban is van antianyag? Egy átlagos banánban 100 grammonként körülbelül 8mg kálium van [23]. Ez nem sok, viszont több mint a nulla, tehát elméletileg érzékelhető a jelenléte. Ezt próbáltam én is megmérni, ebben a második kísérletben.

Ehhez a kísérlethez meghagytam a korábbi mérési helyet és ugyan úgy naplemente után mértem. Viszont ebben az esetben kálium klorid helyett 10 darab banánt használtam a sugárzás forrásának. Szintén számítógéphez kötve a műszert 8 órán keresztül mértem három különböző alkalommal, majd szintén az előző kísérlethez hasonlóan Excel segítségével értékeltem ki az adatokat és készítettem el az alábbi spektrogrammot.



20. ábra, a mérésben szereplő Kálium 40 tartalmú banánfűrtök spektrogramja

Ebben az esetben jól látható már a különbség. A spektrumon jól észrevehető, hogy az elkerülhetetlen háttérzaj teljesen elfedte a mérendő elektronok jelenlétét. A spektrogrammon viszont továbbra is látható a kálium 40 jelenléte, ám ebben az esetben már jóval kisebb koncentrációban. Tehát levonható a következtetés, hogy a mért sugárzás az tényleg a kálium 40, és az általunk keresett elektronok, valamint pozitronok gyakorisága is a kálium 40 koncentrációjához köthető.

### 18.1 A mérés konklúziója

Összesítve az eredményeket látható, hogy az otthon található mindennapi anyagok is képesek sugárzást kibocsájtani, valamint, hogy ezeknek a folyamatoknak az eredménye képen antianyagot előállítani. Viszont sajnálatos módon nem olyan drámaian nagyok a mért értékek, mint az elsőre gondolhattuk volna. Ettől függetlenül ez a két kísérlet demonstrálta, hogy milyen pontos mérésekre is képes egy olyan eszköz, amelyet szinte bárki összeépíthet, valamint, hogy milyen sokat lehet fejleszteni egy eszközön, ha az ember visszatekint a korábbi munkájára és felismeri hol vannak a kevésbé jól megtervezett részek.

A dolgozat lezárásaként tehát szeretném kiemelni, hogy a korábbi mára már játékszernek tűnő PIN diódás eszközt egy sokkal pontosabb, érzékenyebb és használhatóbb eszközzé sikerült fejlesztenem úgy, hogy megtartottam az eredeti célokat, az egyszerűséget és a költséghatékonyságot.

## 19 Források

### 19.1 Ábrajegyzék

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ábra, Az elektromágneses hullámok spektruma [4].....                                                                                                                                                             | 8  |
| 2. ábra, Foton többszöröző vákuum cső felépítésének ábrája, rajta az elnevezések angol neveivel [6]                                                                                                                 | 9  |
| 3. ábra, A Gamma Spectacular és a Justin Atkin által készített mérő egység [8, 9] .....                                                                                                                             | 10 |
| 4. ábra, Open Gamma Detector - Mattias Rosezky gammaspektroszkópja [10] .....                                                                                                                                       | 11 |
| 5. ábra, CERN részecske detektor - Genfi egyetem [25] .....                                                                                                                                                         | 12 |
| 6. ábra, A mikrokontrollerbe beérkező jelek – Oszilloszkópos mérés.....                                                                                                                                             | 19 |
| 7. ábra, LM358 kimeneti frekvencia függése – TI adatlap [15] .....                                                                                                                                                  | 21 |
| 8. ábra, 9V-os zaj szűrő áramkör rész - kapacitás többszöröző kapcsolás .....                                                                                                                                       | 23 |
| 9. ábra, A tápfeszültség zajtartalma - oszcilloszkópos mérés .....                                                                                                                                                  | 24 |
| 10. ábra, komparátor befolyása a referencia feszültségre kondenzátor nélkül és kondenzátorral -<br>Oszilloszkópos mérés.....                                                                                        | 25 |
| 11. ábra, A műszer alap kapcsolása a követelmények alapján .....                                                                                                                                                    | 26 |
| 12. ábra, A megépített mérőműszer részei.....                                                                                                                                                                       | 27 |
| 13. ábra, A mikrokontroller által feldolgozandó jelek - Oszilloszkópos mérés.....                                                                                                                                   | 28 |
| 14. ábra, Fönt: tórium oxidos szövet mások által mért spektruma és a két saját műszer által mért<br>spektrum bal oldalt a korábbi PIN diódás detektor, jobb oldalon pedig az új SiPM detektoros mérés<br>[17] ..... | 34 |
| 15. ábra, Tórium bomlási sora [26] .....                                                                                                                                                                            | 35 |
| 16. ábra, Alap részecskék táblázata (anyag és antianyag) [19] .....                                                                                                                                                 | 36 |
| 17. ábra, Proton bomlása [20].....                                                                                                                                                                                  | 38 |
| 18. ábra, A kálium 40 lehetséges bomlási folyamatai [21] .....                                                                                                                                                      | 39 |
| 19. ábra, a mérésben szereplő Kálium 40 tartalmú Kálium Klorid só spektrogramja .....                                                                                                                               | 41 |
| 20. ábra, a mérésben szereplő Kálium 40 tartalmú banánfűrtök spektrogramja .....                                                                                                                                    | 42 |

## 19.2 Hivatkozások

- [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] Elewise, “Electromagnetic Spectrum,” 2023. [Online]. Available: <https://www.elewise.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](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/ametekortec/technical%20papers/homeland%20security%20applications%20and%20chemical%20weapons%20assay%20pins/whyhighpuritygermaniumhpgeradiationdetectiontechnologysuperiorotherdetectortechnologiesisotopeidentification.pdf?la=en](http://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/technical%20papers/homeland%20security%20applications%20and%20chemical%20weapons%20assay%20pins/whyhighpuritygermaniumhpgeradiationdetectiontechnologysuperiorotherdetectortechnologiesisotopeidentification.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](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] quantummechanics.ucsd.edu. [Online]. Available: [https://quantummechanics.ucsd.edu/ph130a/130\\_notes/node98.html](https://quantummechanics.ucsd.edu/ph130a/130_notes/node98.html). [Accessed 16 04 2024].
- [12] vedantu.com. [Online]. Available: <https://www.vedantu.com/jee-main/energy-is-required-to-excite-a-hydrogen-atom-physics-question-answer>. [Accessed 16 04 2024].
- [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 powersupply 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] wikimedia.org. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles\\_Anti.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles_Anti.svg). [Accessed 16 04 2024].
- [20] O. Eriksson, "researchgate.net," [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Feynman-diagram-of-positron-decay-Protons-and-neutrons-are-not-elementary-particles\\_fig1\\_277845076](https://www.researchgate.net/figure/Feynman-diagram-of-positron-decay-Protons-and-neutrons-are-not-elementary-particles_fig1_277845076). [Accessed 16 04 2024].
- [21] D. W. Engelkemeir, "Positron Emission in the Decay of Potassium 40," *PHYSICAL REVIEW JOURNALS ARCHIVE*, 1962.
- [22] wikipedia.org. [Online]. Available: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Potassium-40-decay-scheme.svg>. [Accessed 16 04 2024].
- [23] "sureshemre.wordpress.com," [Online]. Available: <https://sureshemre.wordpress.com/2015/10/14/did-you-know-that-bananas-produce-antimatter/>. [Accessed 17 4 2024].
- [24] 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].
- [25] i. Nachi, "Thorium decay chain," 2008. [Online]. Available: <https://www.nachi.org/gallery/radon/thoron-decay-chain>. [Accessed 26 03 2023].