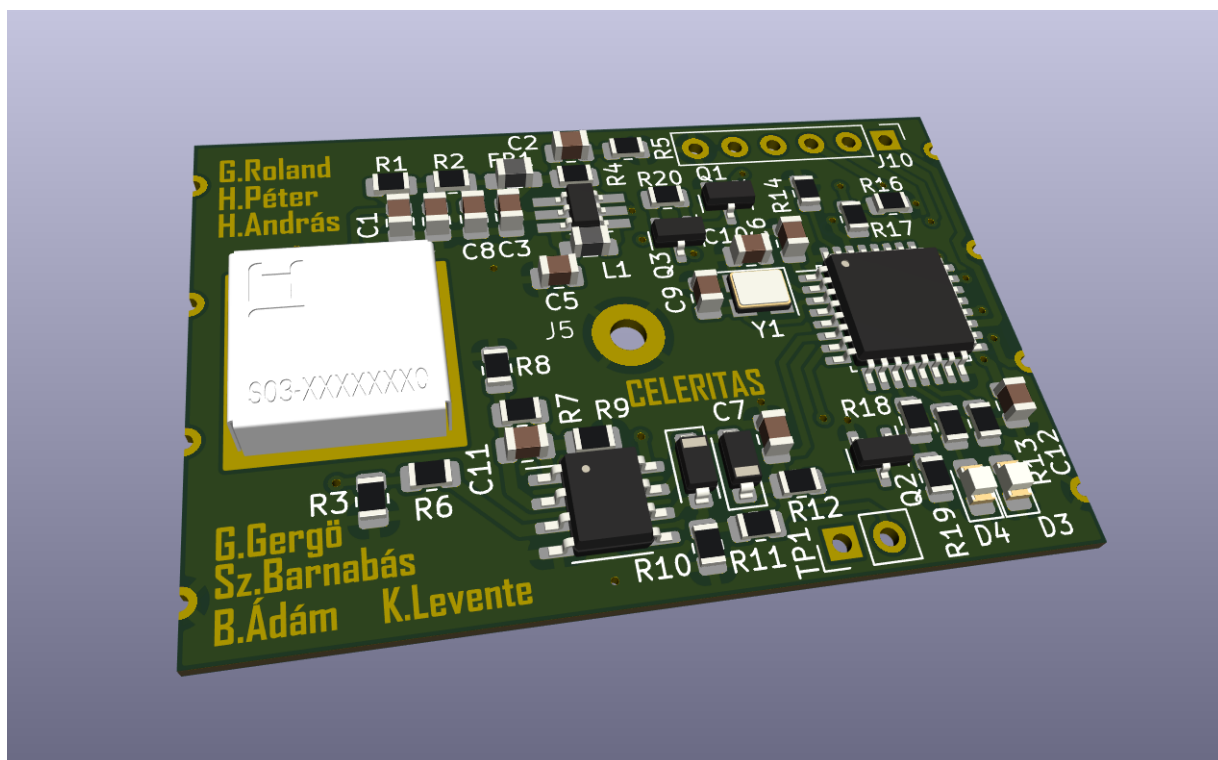


Celeritas repülő példány

dokumentációja



Verzió: 3.4

Összeállította:
Gerendás Roland

Utolsó módosítás:
2026.03.22

Tartalomjegyzék

1. Köszönetnyilvánítás	3
2. Elérhetőségek	3
3. Kísérlet leírása	4
4. Műszaki adatok	4
4.1. Kísérlet főbb műszaki adatai, jellemzői	4
4.2. Használt anyagok listája	5
5. Hardver	5
6. Mérés elmélete	8
7. Szoftver	9
7.1. Indítás folyamata	9
7.2. Modulok	9
7.3. Bufferek	10
7.4. Státuszok	11
7.5. Beállítások	11
7.6. Bytesorrend	12
7.7. Méréstípusok	12
7.7.1. Spektrum mérés	12
7.7.2. Önteszt	13
7.7.3. Státusz jelentés	13
7.8. Parancsok listája	13
7.8.1. Set duration	13
7.8.2. Set scale	14
7.8.3. Request measurement	14
7.8.4. Request selftest	14
7.8.5. Reset	15
7.8.6. Restart	15
7.8.7. Save	15
7.8.8. Stop	16
7.8.9. Force status report	16
7.8.10. Time synchronization	16
7.9. Adatcsomag típusok	16
7.9.1. Welcome message	16
7.9.2. Header	16
7.9.3. Spectrum	17
7.9.4. Geiger count	18
7.9.5. Selftest	18
7.9.6. Default Status report	19
7.9.7. Forced Status report	19
7.9.8. Error	20
7.10. Flash mentések	20
7.11. Timer	21
8. Tesztelés	22
8.1. Hőmérséklet tesztek	22
8.2. Tesztelés a BME Nukleáris Technika Intézetében	22
8.2.1. Sokcsatornás analizátorral	22
8.2.2. Tesztelés a szoftver használatba állításával	23
8.3. Háttérérések	24
8.4. Gammaszpektróscópia nagyobb térfogatú szcintillátorral	24
9. Segédprogramok	27
9.1. CommandGen tool	27
9.2. Sloth	28

1. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk mindazoknak, akik támogatásával ez a projekt megvalósulhatott. Hödl Emil Viktor kapcsolattartásával rajzolódott ki rengeteg fontos információ, melyek úton tartották a tervezés és fejlesztés folyamatát.

Klujber Gergely közreműködésével valósulhatott meg a panel tesztelése a BME Nukleáris Technikai Intézetében. Az analóg áramkör tesztelését és kiértékelését is neki köszönhetjük.

Pál András nyújtott nekünk szcintillátort először, melyel bebizonyosodott a kísérlet kivitelezhetősége.

Szeretnénk kinyilvánítani hálánkat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszéke, a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság, valamint mindenki más felé, aki valamilyen formában részt vett a Műhold fejlesztésében, hogy lehetőséget biztosítottak a projekt, ezen kísérlet alrendszer megvalósítására.

2. Elérhetőségek

Kapcsolattartó személy: Gerendás Roland

Kapcsolattartó email címe: roland.gerendas@gmail.com

Kapcsolattartó telefonszáma: 06 70 54 58 860

A csapat tagjai:

- Bacsó Ádám
- Gerendás Roland
- Gombás Gergő
- Hadházi András
- Horváth Péter
- Kovács Levente
- Szupkay Barnabás

Felelős tagok:

- Gerendás Roland: hardver, elmélet, tesztelés
- Horváth Péter: Szoftver

Közreműködők:

Artem-Lux kft.

Mentorok:

- Klujber Gergely
- Hödl Emil Viktor

Főbb források:

<http://www.cosmicwatch.lns.mit.edu/>

<https://github.com/spenceraxani/CosmicWatch-Desktop-Muon-Detector-v2>

Projekt adatok:

A projekt egyéni finanszírozású. Keret: 360 000 Ft

Időtartam: 2024 június - jelen

3. Kísérlet leírása

Celeritas egy kis helyre sűrített egyszerű, leginkább röntgen tartományban érzékeny spektrométer. Működése egy SiPM szenzoron alapszik, mely egy szcintillátor anyaggal párosítva a bejövő részecskék hatására elektromos jeleket ad. A panelen található mikrokontroller a jeleket mintavételezi és csúcserték szerint bekategorizálja.



1. ábra. Celeritas kísérlet panel

4. Műszaki adatok

4.1. Kísérlet főbb műszaki adatai, jellemzői

Jelölés	Jellemző	Mennyiség	Mértékegység
m	panel tömege	4.8	g
x	panel hossza	45	mm
y	panel szélessége	30	mm
z	panel magassága	3, illetve 4	mm
I_{\max}	maximális áramfelvétel	60	mA
I_{\min}	minimális áramfelvétel	7	mA
E_{\max}, E_{\min}	mérési tartomány	0-1000	keV
U_{boost}	SiPM tápja	30	V
A	Erősítési tényező	10	–
t_{jf}	jelfogó lecsengési ideje	1	ms
t_{SiPM}	SiPM jelének lecsengési ideje	1	μs
t_{minta}	mintavételezési idő	15	μs
U_{noise}	alapzaj jelfogó kimenetén (25 °C)	20	mV
f	órajel frekvencia	32	MHz

1. táblázat. Műszaki adatok

4.2. Használt anyagok listája

Megnevezés	Termék kódja	Származás	Tömeg	Adatlap
Pillanatragasztó	UFI: RJN9-P0SR-R006-MF46	Loctite	< 0.1 g	Loctite.pdf
Folyasztószer	UFI: TH00-003M-T001-TPRP	TermoPasty	< 0.1 g	Flux.pdf
Szcintillátor	-	Ebay	0.1 g	CsI_Tl.pdf
Levegővel zárt tartály	S03-10100300R	Harwin	273 mg	EMI_gasket.pdf
Epoxy ragasztó	IDH: 2751321	Pattex	< 0.1 g	Epoxy.pdf

2. táblázat. Anyaglista

5. Hardver

A hardver 2 főbb részre tagolódik. Az egyik a mikrokontroller és működéséhez szükséges elemek, a másik a méréshez aktiválható analóg jellánc.

Jellánc főbb elemei:

Kapcsolóüzemű táp

- Lt3461 1.3 MHz kapcsolóüzemű step-up konverter
- 30 V -os kimenetre konfigurálva
- Kimenetén Low pass szűrő

SiPM szenzor (Silicon photomultiplier)

- Ez egy fotodiódából (avalanche photodiode, APD) álló mátrixnak tekinthető.
- Záróirányban van bekötve és 30 V -tal van kifizítve
- Fém dobozba van zárva, a tetejére ragasztott szcintillátorral együtt, ugyanis a megfelelő működéshez fényzártnak kell lennie.

Erősítő

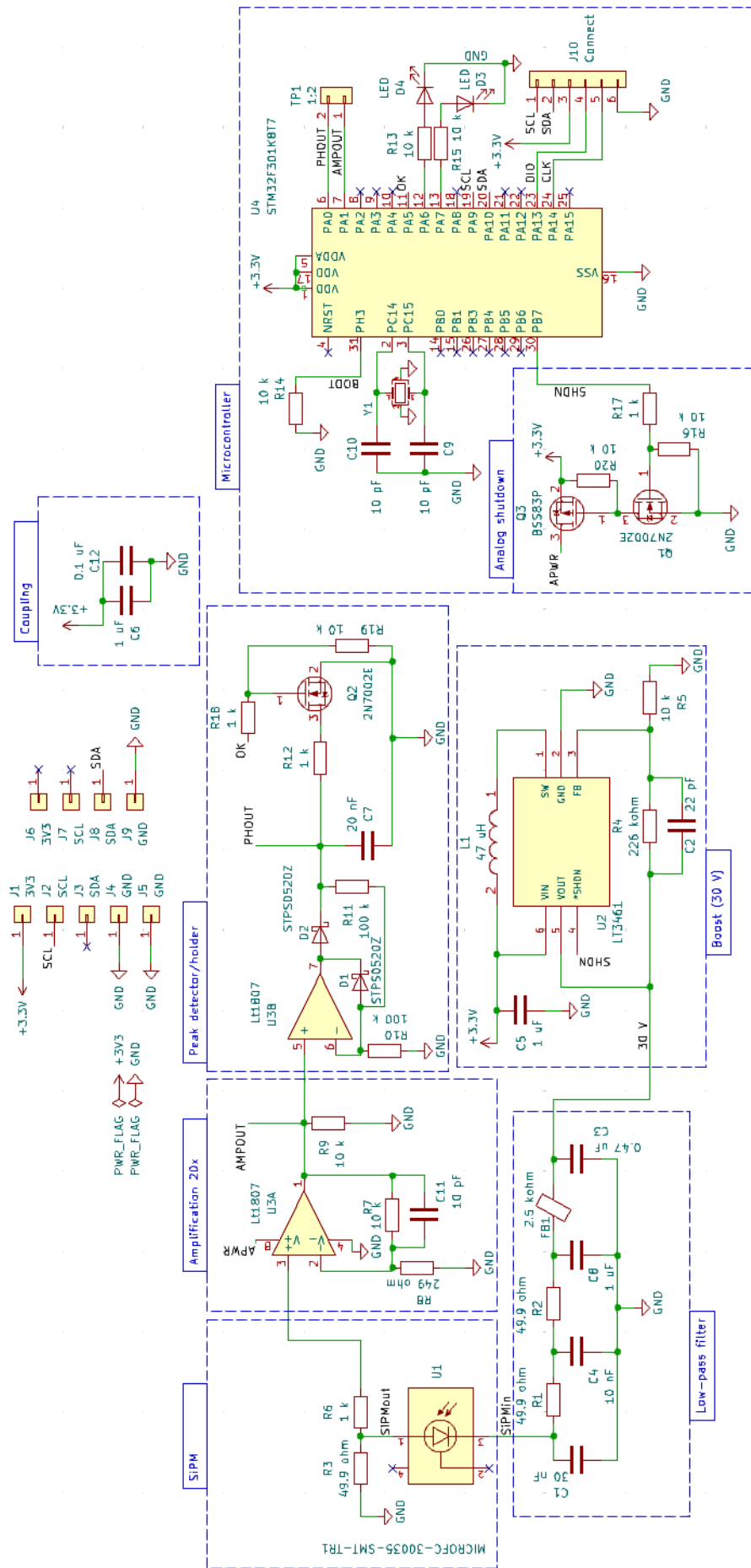
- Lt1807 dual 325 MHz ultra precision rail-to-rail op amp
- Feszültségerősítési tényező: $A = 10$

Analóg jelfogó

- A bemeneti jel közel maximális értékére tölt egy $C = 30$ nF kondenzátort, amin megjelenik a jel csúcsfeszültsége.
- A kondenzátor feszültégét az STM32 12 bites ADC-jával mérjük.

Az STM32 mikrokontroller (LQFP-32 tokozásban):

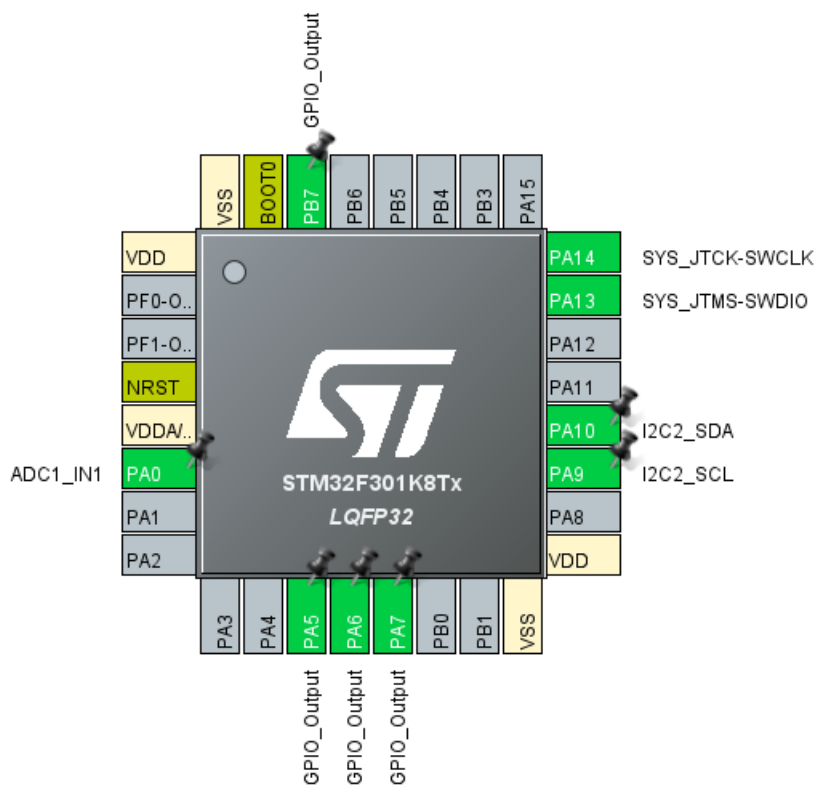
- Teljes megnevezés: STM32F301K8T7
- 1 darab 5 Msps ADC
- 64 kbyte Flash; 16 kbyte SRAM
- Az analóg jelláncot a $\overline{\text{SHDN}}$ lábon keresztül tudja ki- illetve bekapcsolni, azaz árammal ellátni.



2. ábra. Kapcsolási rajz

Megnevezés	kimenet	láb a csomagoláson
Debug LED 1	PA7	13
Debug LED 2	PA6	12
$\overline{\text{SHDN}}$	PB7	30
Kisütő tranzisztor (OK)	PA5	11
Serial DIO és CLK	PA13, PA14	23, 24
SCL és SDA (I2C)	PA9, PA10	19, 20
32 MHz kristály	PF0, PF1	2, 3
Erősítő bemenet	PA1	7
Peak holder bemenet (ADC)	PA0	6
NRST	van belső pullup	-
BOOT	alacsonyra van húzva	31

3. táblázat. A kontroller perifériái

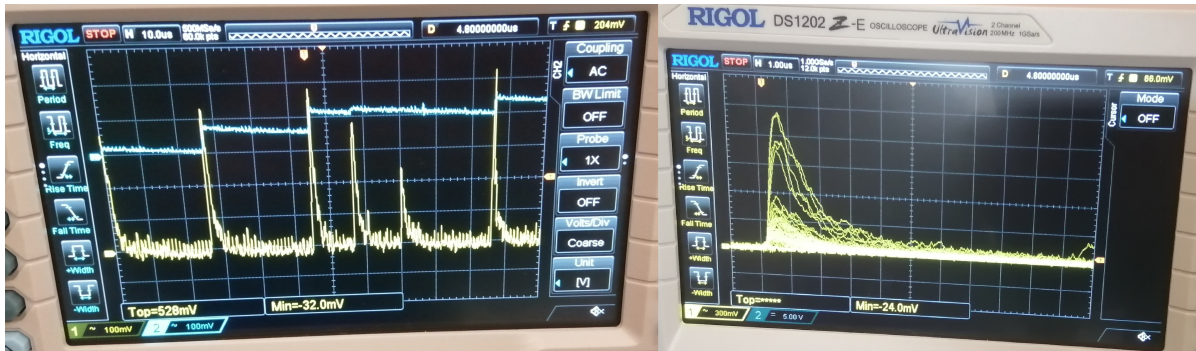


3. ábra. Kontroller lábai

6. Mérés elmélete

Ionizáló részecskék átjutnak a fénymentesen zárt doboz falán és a szcintillátor anyagban elnyelődnek, melynek hatására az a veszteségektől eltekinve az eredeti energiával arányos darabszámú fotont bocsát ki 450 nm környékén. A SiPM záróirányba van kapcsolva. Az egyszerű modell szerint egy-egy látható foton egy-egy mikrocellát süt ki a SiPM-ben, melynek hatására az darabszám arányosan vezetővé válik, így feszültség jelenik meg a nyitóoldalán. A mikrocellák a beléjük épített töltőellenállások segítségével kerülnek vissza kezdeti állapotba, a lecsengés exponenciális.

A jelet az erősítő fokozat húszszorozza, majd a jelfogó kitartja.

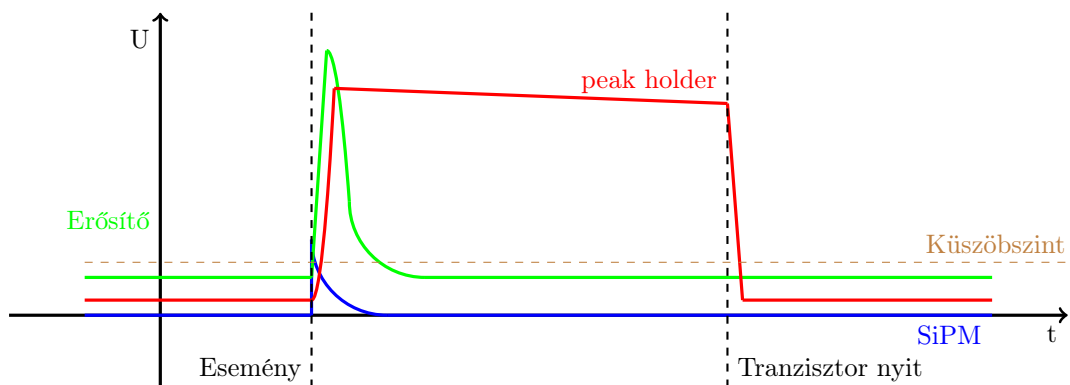


4. ábra. Sok egymás után érkező erősített (sárga), majd kitartott (kék) jel oszcilloszkópon

Jel	SiPM kimenetén	Erősítő kimenetén	Jelfogó kimenetén
Alapzaj átlagértéke	-	-	20 mV
Jelforma	ugrás, exponenciális lecsengés	(soros RC kör)	
Csúcsérték	0-300 mV	20-3300 mV	20-3000 mV
Lecsengési idő	1 μ s	5 μ s (440 mV-ról)	1200 μ s (560 mV-ról)
Lecsengés okézással	-	-	20 μ s (470 mV-ról)

4. táblázat. Jelek mért jellemzői

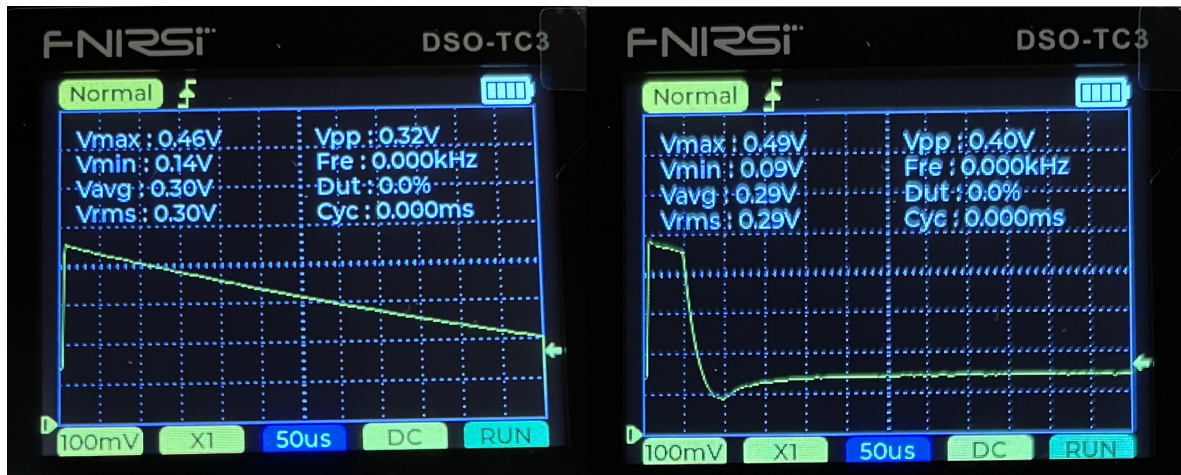
A mikrokontroller mintavételezési ideje pollingal 6 μ s, melyet adatlapból vettünk és oszcilloszkóppal validáltunk. A program futásával együttvéve ez mintavételezésenként átlagosan 15 μ s köré tehető, bár a mintavételezések számától is függ.



5. ábra. Jel értelmezése

A mikrokontroller a jelfogó kimenetét monitorozza. Amikor a feszültség a meghatározott küszöbérték felé ugrik (és az alsó, felső küszöb közé eső mérési tartományba), onnantól kezdve megadott számú mintavételezés történik. A jelfogó alpból is földelve van 200 k Ω -on keresztül, ezért a végén lévő kondenzátor feszültsége már önmagában is esik, azonban ez olyan lassú, hogy néhány mintavételezés erejéig eltekintünk tőle. Ez után addig vár, amíg a jelszint visszaesik az alsó küszöb alá. Ez azért lehet problémás, mert sok csúcst nem tudunk egymás után megmérni. Erre ad megoldást az „okézás”-nak elnevezett ötletünk.

Az okézás elve, hogy miután a mintavételezés megtörtént, a mikrokontroller egy N-csatornás MOSFET-el 1 k Ω -on keresztül földhöz köti a jelfogót, így az jóval gyorsabban sül ki a beállított küszöb alá. (kapcsolási rajz)

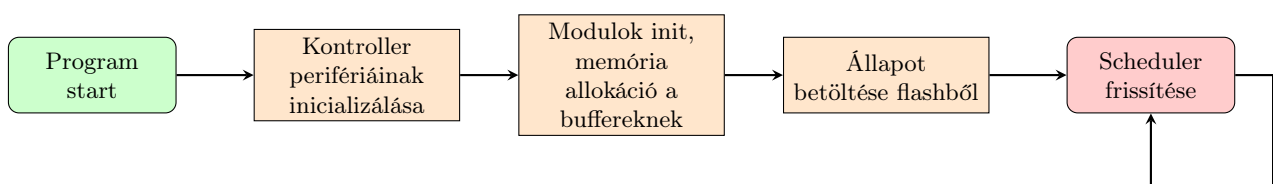


6. ábra. Jelfogó lecsengése szabadon (bal) és okézással (jobb)

7. Szoftver

7.1. Indítás folyamata

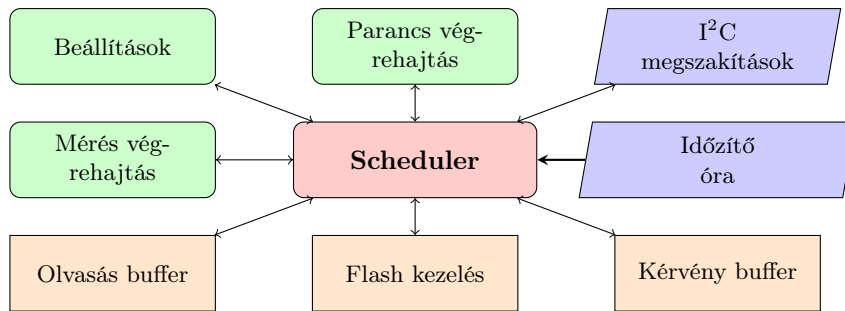
A program indításkor először inicializálja a perifériákat (GPIO, ADC, I2C bus), memóriát allokálunk, majd a kikapcsolás előtti állapot kerül visszaállításra Flash-ból. A Scheduler modul programunk központi része, mely ütemezi és végrehajtja a mérési kéréseket, valamint kezeli a különböző események (például: I2C kommunikáció vége, parancs sikeres teljesítése, alvó mód) reakcióit. A fő ciklus ennek a modulnak a frissítő rutinja, mely közvetlen a main ciklusba van beágyazva (scheduler_update függvény).



7. ábra. Indítási folyamat

7.2. Modulok

A Scheduler végzi a koordinációt a különböző almodulok között. Összehangolja az I²C kommunikációt, a mérések végrehajtását, a parancsok értelmezését, a beállítások kezelését. Továbbá hozzáférése van a háttértárhoz és a két fő memória bufferhez. Az időzítést egy timer végzi, melyet szinkronizálni lehet.



8. ábra. Scheduler feladatai

7.3. Bufferek

I²C queue / kérvény buffer:

ezt hívjuk annak a tömbnek, amelyben az OBC továbbítására szánt adatsomagok helyet foglalnak. 256 db 16 byteos helyből áll, körkörös buffer. Ha önmaga végére ér, akkor előlről kezd haladni és felülírja az addig ott lévő adatokat. Reset esetén az összes hely 0 értéket vesz fel.

Request queue / olvasás buffer:

a kivitelezendő mérések és azok beállításainak tárolására fenntartott tömb. 102 helyből álló, helyenként 20 byteos. Minden új kérelmet bubble sort algoritmussal idő szerint rendezi be, hogy az időben legközelebb soron lévő mérés álljon elől, így a scheduler azt monitorozza, végre lehet hajtani, vagy a múltban van-e? A scheduler beolvasás után törli azt a helyet. Az ismétléses mérések (repetitions) külön kérvényekként hívódnak meg benne.

A bufferekben nyilván vannak tartva a beszúrás, olvasás pozíciók és az aktív cellák száma (cursor->head, tail, size).

jellemző	Request queue	I2C queue
Méret	1 kByte	2 kByte
Helyek száma	102	256
Egyetlen hely mérete	20 byte	16 byte
Mutató memóriában	0x200003a8	0x20000ba8
Flash page mutató	0x800b800	0x800a800

5. táblázat. Bufferek jellemzői

7.4. Státuszok

A scheduler meghatározó változója a státusza, mely önmagában is sok paramétert kezel, illetve visszahatások is kezelik a státuszt. Bizonyos folyamatok szigorúan státuszhoz kötöttek és megszakadnak annak változásakor. A státusz enum-ként van deklarálva.

status	érték	jellemző	fogyasztás
SLEEP	0x01	Alvó állapotba kapcsolt a minimális fogyasztás elérése érdekében	7 mA
IDLE	0x02	Nincs következő mérési kérvény, 255 sec tétlenség után SLEEP státusz	16 mA
STARTING	0x03	Van következő mérési kérvény, de annak kezdési ideje nem jött még el	16 mA
RUNNING	0x04	Zajlik a mérési folyamat	50 mA
FINISHED	0x05	Mérés éppen befejezés alatt áll	50-16 mA

6. táblázat. Státuszok

7.5. Beállítások

A globális beállítások kezelik, hogy egy mérési parancs hívásakor milyen paraméterekkel kerüljön elraktározásra a szándék a bufferbe. Amikor elérkezik az adott mérés kivitelezésének ideje, akkor ezen paraméterekkel indul majd a mérési ciklus.

Beállítás	alapérték	értéktartomány
MODE_OF_OPERATION	MAX_HITS	MAX_HITS, MAX_TIME, SELFTEST
IS_OKAY	true	true / false
DURATION	10	0-65535
REPETITIONS	1	0 - 63
BREAKTIME	0	0-65535
MIN_VOLTAGE	200	0 - 4095
MAX_VOLTAGE	4095	0 - 4095
RESOLUTION	16	1, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024
SAMPLES	3	0 - 255

7. táblázat. Beállítások

Megjegyzések: REPETITIONS 0 esetén is egyetlen mérést hoz létre. RESOLUTION = 1 Geiger counter módnak nevezzük. Minimum küszöbértéknek kisebbnek kell lennie, mint a maximumnak - de ezt a panel szoftver nem ellenőrzi.

Leírás

- **MODE_OF_OPERATION:** A mérés típusát határozza meg, mely lehet beütések számában korlátozott, időtartam korlátozott, illetve öncélú tesztelés.
- **IS_OKAY:** [Okézás](#) bekapcsolása vagy kikapcsolása.
- **DURATION:** Mérés hosszát befolyásolja. MAX_HITS = 0 esetén a maximális darabszámot, MAX_TIME = 1 esetén a mérési idő (másodpercben mért) hosszát határozza meg, miután a mérés leáll.
- **REPETITIONS:** Azt határozza meg, egyetlen mérési parancs hány darab időben a BREAKTIME másodpercben értelmezett értékével eltolt mérési kérvényt hozzon létre.
- **BREAKTIME:** A REPETITIONS-al létrehozott mérés kérvények kezdési időpontjai hány másodperccel egyenlően egymás után eltolva.

- **MIN_VOLTAGE**: Mérési intervallum alsó határa ADC értékben.
- **MAX_VOLTAGE**: Mérési intervallum felső határa ADC értékben.
- **RESOLUTION**: Csatornaszám, azaz ahány darab azonos szélességű intervallumra szeretnénk osztani a mérési tartományt.
- **SAMPLES**: Beütés érzékelésekor hány mintavételezés történjen.

7.6. Bytesorrend

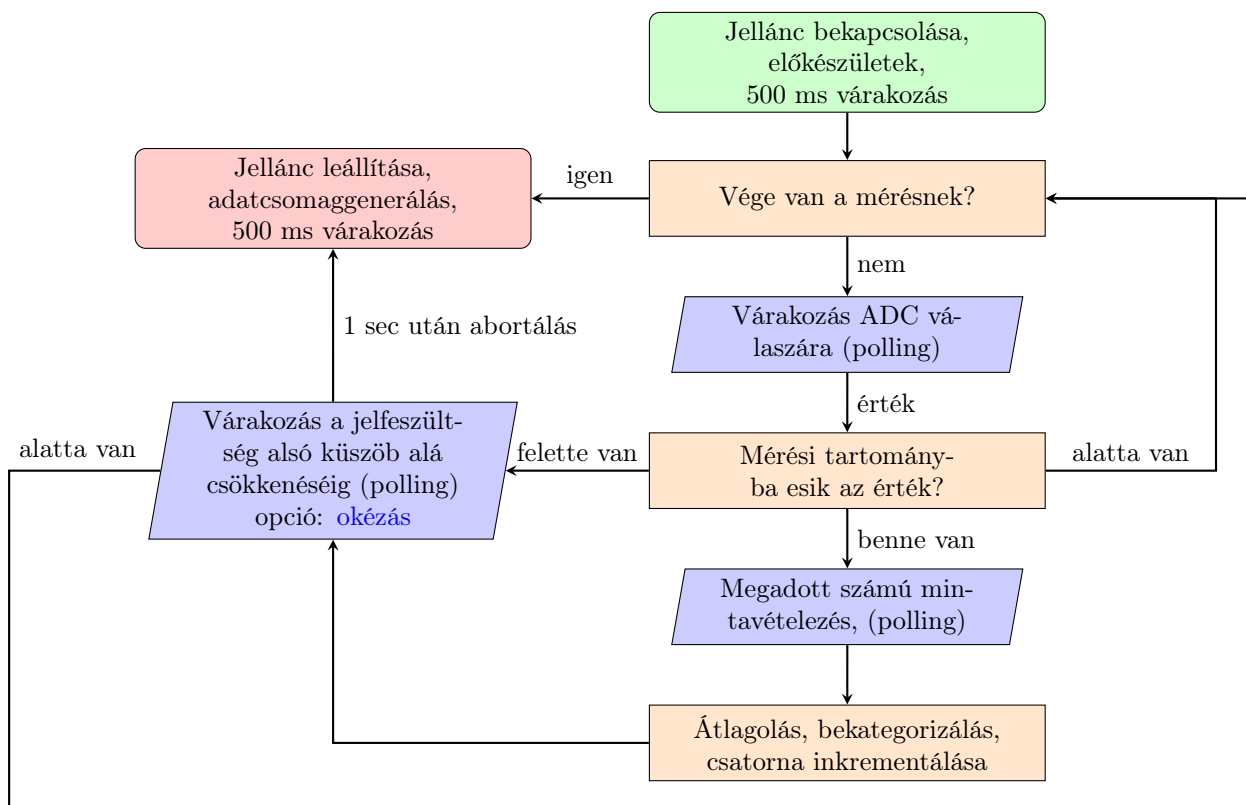
Panelünk önmagán belül big endian kódolást használ, így terminálból könnyebb elolvasni és emberként értelmezni a tartalmat. Az időszinkronizáció könnyítéséért az óra little endiant használ.

7.7. Méréstípusok

7.7.1. Spektrum mérés

A mérést befolyásolják beállítások, így lehet mérni egy konkrét ideig, de lehet várni részecskeszámot is. Van számláló mód, viszont energia szerinti spektrumot is lehet felállítani.

A mérés záródhat errorral. Alapjáraton egy **header packet** kerül letárolásra és felbontással arányos **spectrum packet**.



9. ábra. Mérés állapotgépe

7.7.2. Önteszt

Az önteszt (selftest) célja felmérni a hardver helyes működését, tápellátást, hőmérsékletet, hibákat. Meghívás esetén nagyjából kettő másodpercig tart, egy [selftest packettel](#) tér vissza.

7.7.3. Státusz jelentés

A státusz jelentés (status report) automatikusan hívódik meg interrupt alapon, amikor elfogytak a read bufferből a küldendő adatcsomagok. Ekkor a [státusz jelentés](#) kerül továbbításra az OBC számára. A státusz jelentés tartalmaz hőmérsékletet, de ez csak IDLE státuszban kerül megmérésre.

7.8. Parancsok listája

Parancs	kód	rövid leírás
Set duration	0xE0	A mérés hosszát befolyásoló beállítások állítása.
Set scale	0xD0	A mérési intervallummal kapcsolatos beállítások állítása.
Request measurement	0x07	Mérésütemező parancs.
Request selftest	0x06	Selftest-et ütemező parancs.
Reset	0x0F	Alaphelyzetbe állítja a modult, kitörli a biztonsági mentést, újraindít.
Restart	0x0E	Újraindítja a mikrokontrollert.
Save	0xAA	Biztonsági mentést készít a rendszer állapotáról.
Stop	0xBB	Leállítja az éppen soron lévő mérési folyamatot, előkészületet.
Force status report	0xCC	Helyben csináltat egy status reportot, de ezt az olvasás queue-ba menti.
Time synchronization	0x54	OBC general call, időszinkronizációs parancs.

8. táblázat. Parancsok listája

Példák

A következőkben egy-egy példán keresztül próbáljuk ismertetni a parancsok funkcióit.

Megjegyezzük, hogy habár nem írtuk ki, de az olvasás byte 0xA3, az írás pedig 0xA2, mivel a kísérlet 7 bites címe 0x51. A folyamatok ezen byteok felismerése után zajlanak le.

Az első két parancs felel a beállítások konfigurálásáért.

7.8.1. Set duration

0xE0010D0078007D11

0	1	2	3	4	5	6	7
0xE0	0x01	0x0D	0x00	0x78	0x00	0x7D	0x11
kód	ID	rep-md-ok	DURATION		BREAKTIME		Checksum
224	1	3, 0, 1	120 sec		125 sec		17

- kód: parancs kódja.
- ID: parancs azonosítója, ezt a felküldésnél adjuk neki.
- rep-md-ok: első 6 bit meghatározza a REPETITIONS számát, az utolsó előtti bit a módot (MAX_HITS / MAX_TIME), az utolsó az okézást kapcsolja.
- DURATION: mérés hossza.
- BREAKTIME: különálló mérések kezdése közötti idő.
- Checksum: az adatcsomagban lévő 1 értékű bitek darabszáma.

Konkrét példa: set duration parancs, 1-es azonosítóval. Beállítások változnak: 3-szor ismételt egyetlen mérést, időkorlátolt, 120 másodpercig tart, két mérés kezdete között 125 másodperc telik el, okzés funkció be van kapcsolva.

7.8.2. Set scale

0xD0480BAC1E100212

0	1	2	3	4	5	6	7
0xD0	0x48	0x0B	0xAC	0x1E	0x10	0x02	0x12
kód	ID	mérési tartomány			res	sample	Checksum
208	72	186, 3102			128	2	18

- kód: parancs kódja.
- ID: parancs azonosítója.
- mérési tartomány: a mérés alsó és felső küszöbértéke ADC értékben.
- res: felbontás avagy csatornaszám. Az érték nyolcszorosát kell venni, hacsak nem nulla, ami Geiger counter módot jelent, (az az 1). pl $0x10 = 16$; $16 \cdot 8 = 128$
- sample: Mintavételezések száma.
- Checksum: az adatsomagban lévő 1 értékű bitek darabszáma.

Konkrét példa: set scale parancs, 72-es azonosítóval. Beállítások változnak: a mérési tartomány 186 és 3102 ADC érték között kerül felosztásra (ez nagyjából 150 és 2500 mV -ot jelent) 128 különböző intervallumra, melyekben külön számolja a beütéseket. Egyetlen beütést kétszer mintavételez.

A következő két parancsal lehet mérést beütemezni

7.8.3. Request measurement

0x078327163E68C017

0	1	2	3	4	5	6	7
0x07	0x83	0x27	0x16	0x3E	0x68	0xC0	0x17
kód	ID	kivitelezés ideje				bool byte	Checksum
7	131	1748899367 UNIX				1, 1	23

- kód: parancs kódja.
- ID: parancs azonosítója.
- kivitelezés ideje: little endian kódolású, UNIX formában adja meg, mikor kell a(z első) mérést elindítani.
- bool byte: első bitje adja meg, hogy ha a mérés közben betelne egy csatorna, akkor leáljon-e a mérés (continue_with_full_channel) = true esetén nem áll le. A második bitje állítja, hogy legyen-e header adatsomag?
- Checksum: az adatsomagban lévő 1 értékű bitek darabszáma.

Konkrét példa: mérésütemező parancs. 1748899367 UNIX időpontban fog elindítani mérést, illetve egymás után fűzött méréseket, ha a REPETITIONS nem 0 vagy 1. A mérések nem állnak le, ha az egyik csatorna esetleg betelne, viszont nincs overflow. A mérés végeztével header adatsomagot is generálni fog.

7.8.4. Request selftest

0x0627FFFFFFFF0026

0	1	2	3	4	5	6	7
0x06	0x27	0xFF	0xFF	0xFF	0xFF	0x00	0x26
kód	ID	kivitelezés ideje				üres	Checksum
6	39	azonnal, 2 sec múlva				-	38

- kód: parancs kódja.
- ID: parancs azonosítója.
- kivitelezés ideje: teljesen hasonló a Request measurement-hez, az 0xFFFFFFFF mindkét parancs esetén azonnali mérést ütemez be.
- Checksum: az adatsomagban lévő 1 értékű bitek darabszáma.

Konkrét példa: öntesztelést ütemző parancs. A jelenlegi időhöz képest két másodperccel fog elindítani egy tesztet.

A következő parancsok egyszerűbb felépítésűek, vezérlés funkcióval rendelkeznek.

7.8.5. Reset

0x0F02000000000005

0	1	2	3	4	5	6	7
0x0F	0x02	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x05
kód	ID	üres					Checksum
15	2	-					5

Visszaállítja a flash háttértárat egy minta állapotra, majd újraindítja a mikrokontrollert.

7.8.6. Restart

0x0E03000000000005

0	1	2	3	4	5	6	7
0x0E	0x03	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x05
kód	ID	üres					Checksum
14	3	-					5

Újraindítja a mikrokontrollert

7.8.7. Save

0xAA05000000000006

0	1	2	3	4	5	6	7
0xAA	0x05	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x06
kód	ID	üres					Checksum
170	5	-					6

Mentést csinál a flashbe, amelyből a controller vissza tud tölteni egy kikapcsolás előtti állapotot.

7.8.8. Stop

0xBB630000000000A

0	1	2	3	4	5	6	7
0xBB	0x63	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x0A
kód	ID	üres					Checksum
187	99	-					10

STARTING státuszban TIMEOUT-al kivégzi a következő mérési kérvényt.
RUNNING státuszban leállítja a mérést, viszont hagyja a packetgenerálást.

7.8.9. Force status report

0xCC01000000000005

0	1	2	3	4	5	6	7
0xCC	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x05
kód	ID	üres					Checksum
204	1	-					10

Azonnal kiviteleztet egy status reportot és elmenti az olvasás bufferbe.

7.8.10. Time synchronization

0x54683F4B90

0	1	2	3	4
0x54	0x68	0x3F	0x4B	0x90
kód	UNIX időbélyeg			
84	1748978576 sec			

OBC general call, tehát a cím byte 0x00. Szinkronizálja a saját órát az OBC órájához.

7.9. Adatcsomag típusok

7.9.1. Welcome message

Minden újraindításkor ez az első packet, ami automatikusan létrejön a bufferben. Ez jelzi, hogy a panel sikeresen elindult. A kód ASCII-ben van és "Celeritas" -t ír.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0x43	0x65	0x6C	0x65	0x72	0x69	0x74	0x61	0x73	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00

7.9.2. Header

A header adatcsomagok a mérés körülményeiről tárolnak információt.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ID	IC	T ₁	T ₂	t			N	i, j			U _{ref}	0xFF	CHS		

- **ID**: azonosító, amivel a mérés kérvényezésre került.
- **IC**: interrupt count. I2C megszakítások száma a mérés ideje alatt.

- T_1 : Hőmérséklet a mérés kezdetén °C, signed int.
- T_2 : Hőmérséklet a mérés végén °C, signed int.
- t : Befejezés UNIX ideje.
- N : Spektrum adatcsomagok száma, kivétel: nulla Geiger counter módban.
- i, j : Mérési intervallum alsó, felső határa ADC értékben.
- U_{ref} : Referencia feszültség, gyakorlatilag a tápfeszültség.
- $0xFF$: Header jelző byte.
- CHS : Checksum, 1-es értékű bitek száma.

```

-----
Results of the measurement |
-----
ID of the measurement request: 1
Interrupt count: 0
Temperature at the start of the measurement: 25 °C
Temperature at the end of the measurement: 25 °C
Time of finish: 32 UNIX
Number of packets: 3
Number of channels (resolution): 16
Lower threshold: 200
Higher threshold: 4095
Reference voltage at the end of the measurement: 3317 mV
Checksum: 42 != 42 OK
Spectrum contents: [7, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
Total number of peaks: 10
-----

```

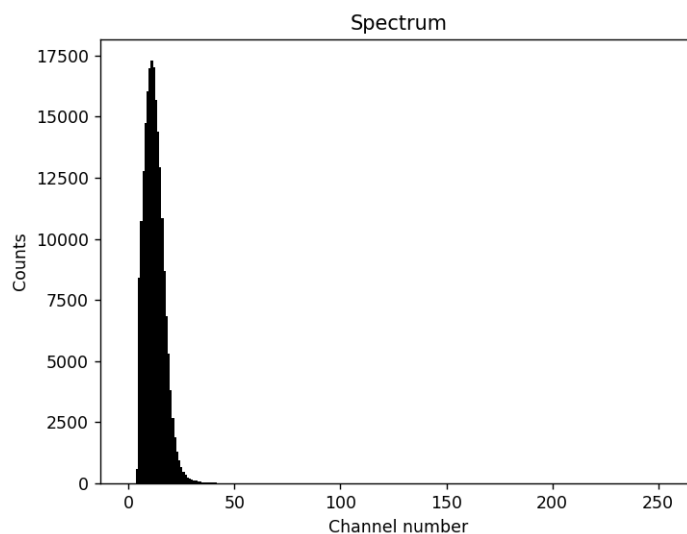
10. ábra. Header kiértékelése Sloth nevű python feldolgozó programunkban

7.9.3. Spectrum

Spectrum adatcsomagok konkrét beütésszámokat tárol. Egyetlen adatcsomag összesen nyolc csatornába érkezett darabszámokat tud letárolni, így nagyobb felbontások esetén a spectrum packetek a header után fűzve érkeznek le. A csatornaszámok növekvő sorrendben vannak elhelyezve mind az adatcsomagnon belül, mind a több spectrum adatcsomag között. Egyetlen csatorna uint16_t típusban kerül eltárolásra.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8								

- n_i : Beütések száma különböző csatornánként. Intervallumonként legfeljebb 65535 lehet.



11. ábra. Amerícium-241 spektruma 256 csatornán, 150 és 3300 mV mérési tartományon

7.9.4. Geiger count

Olyan mérést hordozó adatsomag, amely egyetlen nagy csatornából áll.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
üres						N						0xAA	CHS		

- **0xAA**: Geiger count jelző byte
- **N**: Számlálás értéke, uint64_t típusban, big endian.
- **CHS**: checksum, egyesek száma

```

-----
Results of the measurement |
-----
ID of the measurement request: 1
Interrupt count: 0
Temperature at the start of the measurement: 24 °C
Temperature at the end of the measurement: 25 °C
Time of finish: 827 UNIX
Number of packets: 2
Number of channels (resolution): 1
Lower threshold: 186
Higher threshold: 4095
Reference voltage at the end of the measurement: 3319 mV
Checksum: 50 ?= 50 OK
Geiger packet checksum: 36 ?= 36 OK
The geiger count: 159
-----

```

12. ábra. Geiger számláló kiértékelése

7.9.5. Selftest

A panel öntesztelésekor létrejövő adatsomag

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ID	T	U _S	N _{error}	t			R _{next}	P _{next}	B	U _{ref}	U _L	0xFE	CHS		

- **ID**: Azonosító, amivel a selftest meg lett hívva.
- **T**: Hőmérséklet °C, signed int.
- **U_S**: Egyetlen mitavétel a jellánc kimenetéről, mV-ban.
- **N_{error}**: Az olvasás bufferben tárolt hiba packetek száma.
- **t**: UNIX időpont.
- **R_{next}**: következő kérvény azonosítója.
- **P_{next}**: következő I²C olvasásra kerülő adatsomag azonosítója.
- **B**: Byte utolsó bitje tartalmazza, hogy van-e aktív mentés. Utolsó előtti bitje pedig jelzi, hogy az utolsó mérés hagyományosan, hibamentesen zárult-e?
- **U_{ref}**: Tápfeszültség avagy referencia feszültség mV-ban, 12 biten.
- **U_L**: Egy másodpercen keresztül átlagolt érték a jellánc kimenetéről, mV mértékegységben, 12 biten.
- **0xFE**: Selftest jelző byte
- **CHS**: Checksum

```

-----
Results of the selftest |
-----
ID of the selftest request: 92
Temperature: 25 °C
Number of errors in i2c queue: 0
Time of selftest: 891 UNIX
ID of the next request in Request queue: ID = 0
ID of the next read in i2c queue: ID = 0
Last measurement: finished regularly
Backup SAVE = FALSE
Reference voltage: 3055 mV
Voltage on the output of the peak holder:
  1 second average 8 mV
  Short measurement 7 mV
Checksum: 37 != 37 OK
-----

```

13. ábra. Selftest kiértékelése

7.9.6. Default Status report

Üres olvasás buffer esetén generált automatikus adatcsomag.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	t			peak counter				cursor _r		T	ID	IC	0x55	CHS	

- **S**: Celeritas jelenlegi státusza.
- **t**: UNIX időpont.
- **peak counter**: Beütések jelenlegi száma. Mérés végeztével az előző mérés beütésszáma marad.
- **cursor_r**: Kérvény buffer mutatói: head = olvasás-, tail = beszúrás pozíciók.
- **T**: Hőmérséklet °C, signed int.
- **ID**: Jelenlegi mérési azonosító. (0 = nincs).
- **IC**: Megszakítások jelenlegi száma (ez mérés közben térhet el nullától).
- **0x55**: Default status report jelző byte-ja.
- **CHS**: checksum, egyes értékű bitek száma a packetben

```

-----
Results of the default status report |
-----
Status of Celeritas: IDLE
Time of the Status report: 1369 UNIX
Peak counter: 706464
Request cursors:      head: 4   tail: 4
Temperature: 26 °C
Current request ID: 0
Number of interrupts: 0
Checksum: 27 != 27 OK
-----

```

14. ábra. Default status reportok kiértékelése

7.9.7. Forced Status report

Force status report paracsra kerül letárolásra ez az adatcsomag.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	t			cursor _P			cursor _R		T	ID	t _{sleep}	0x56	CHS		

- **S**: Celeritas jelenlegi státusza.
- **t**: UNIX időpont.

- **cursor_P**: Olvasás buffer mutatói: size = aktív elemek száma, head = olvasás-, tail = beszúrás pozíciók.
- **cursor_R**: Kérvény buffer mutatói: size = aktív elemek száma, head = olvasás-, tail = beszúrás pozíciók.
- **T**: Hőmérséklet °C, signed int.
- **ID**: Jelenlegi mérési azonosító. (0 = nincs).
- **t_{sleep}**: Alvásig hátralévő idő, minden I²C kommunikáció végeztével maximális értékről kezd el visszaszámolni.
- **0x56**: Forced status report jelző byte-ja.
- **CHS**: checksum, egyes értékű bitek száma a packetben

```

-----
Results of the forced status report
-----
Status of Celeritas: IDLE
Time of the Status report: 805 UNIX
I2C cursors: size: 4 head: 9 tail: 13
Request cursors: size: 0 head: 1 tail: 1
Temperature: 25 °C
Current request ID: 0
Seconds remaining before sleep: 253
Checksum: 29 ?= 29 OK
-----

```

15. ábra. Forced status reportok kiértékelése

7.9.8. Error

Adatcsomagok, melyek hibákat hivatottak jelezni. Hiba fellépésekor a folyamat is megszakad. Először a felépítésük:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ID	üres												Type	0xD5	CHS

- **ID**: Parancs azonosító, melynek következtében illetve után a hiba létrejött.
- **Type**: Hiba kódja típus alapján
- **0xD5**: Hiba jelző byte
- **CHS**: Checksum, egyes értékű bitek száma a packetben

A következő táblázat összefoglalja az error típusokat

Típus	kód	rövid magyarázat
UNKNOWNCOMMAND	0xFE	ismeretlen parancs
CORRUPTED	0xF7	parancs checksumja hibát jelez
TIMEOUT	0xFD	mérés nem tudott elindulni a megadott időpontban
MEASUREMENT	0xFB	túl hosszú ideig nem csökkent vissza a jelfeszültség a küszöb alá
TERMINATED	0xF0	mérés közben a paneltől megvonták az áramellátást
I2CQUEUEFULL	0xDF	elfogytak a szabad helyek az olvasás bufferben
REQUESTQUEUEFULL	0xBF	elfogytak a szabad helyek a kérvény bufferben
REQUESTSORT	0xFC	a rendezőalgorithmus mutatója elszabadult, extra biztonság

9. táblázat. Hibák

7.10. Flash mentések

A szoftver három esetben nyúl vissza a flashhez.

- Minden mérés elkezdésekor és befejezésekor a Scheduler főbb változói mentésre kerülnek. Ez teljesen automatikusan történik. Innen tudhatjuk például, ha egy mérés kényszeresen megszakadt.
- Ezen kívül parancsra kerül elmentésre az egész rendszer állapota, a bufferekkel, beállításokkal, kurzorokkal együtt. Egy újraindítás esetén ezek az adatok kerülnek vissza a megfelelő modulokba.
- Továbbá a reset parancs meghívásakor a flashbe alapértékek kerülnek mentésre. A beállítások visszaállnak alapra, a bufferek tartalma kinullázódik, a Scheduler újraindul a kurzorokkal együtt.

7.11. Timer

A panelen system tick interrupt segítségével saját óra ketyeg millisec pontossággal, mely szinkronizálható. Ez az óra alapján kerülnek indításra a mérések. A kísérlet panelen van külső oszcillátor, ennek 32 MHz-es órajelét használjuk vezérlésre.

8. Tesztelés

8.1. Hőmérséklet tesztek

A panel megjárta a mélyhűtőt és a konyhai sütőt is. A panelek átestek a szükséges hőmérséklet és rázóteszteken a műhóddal együtt. Az Onionsat közreműködésével a panel külön is eljutott hőkamrába az Onionsat és a Capysat kísérletekkel közös OBC emulátoron.

8.2. Tesztelés a BME Nukleáris Technika Intézetében

8.2.1. Sokcsatornás analizátorral

Eszközök:

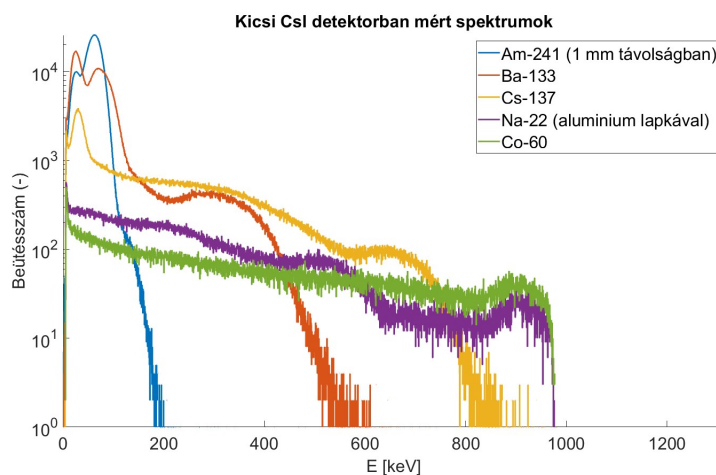
- Canberra Multiport II sokcsatornás analizátor
- Canberra 2022 spektroszkópiai erősítő
- Rigol DS1202Z-E oszcilloszkóp
- Laptop

Az aktivált analóg jellánc erősített kimenetét kapcsoltuk az oszcilloszkópra és a spektroszkópiai erősítőre, mely a sokcsatornás analizátor számára formálta értelmezhetővé a jeleket. A teszteléshez radioaktív forrásokat használtunk, melyek számított adatait az alábbi táblázat összegezi:

izotóp	gyártási idő	A_0 (kBq)	felezési idő (év)	eltelt idő (év)	A (kBq)
Na-22	2010.04.01	449.5	2.6019	14.7	9.0
Ba-133	1993.02.01	402.5	10.51	31.8	49.3
Am-241	2010.04.01	449.0	432.2	14.7	438.6
Cs-137	2008.03.01	104.1	30.07	16.8	70.8
Co-60	2010.04.01	453.5	5.2714	14.7	65.9

10. táblázat. Izotópok aktivitása

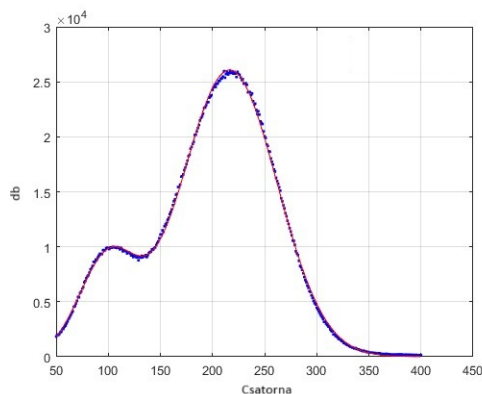
A detektort néhány percig kitettük az intenzív sugárzásnak, melynek hatására rengeteg beütést érzékelt. Az eredményeket jól szemlélteti az alábbi összesített ábra, melyen a beütésszám van feltüntetve logaritmikus skálán a részecskék kalibrált energiájának függvényében.



16. ábra. Beütések logaritmikus skálán energia függvényében

Már itt szembeötlő, mennyivel érzékenyebb a detektor az alacsonyabb energiákra. Nagy energiájú részecskékre az észlelési hatások 0-hoz konvergál. Ez főleg a scintillátor kis méretéhez köthető.

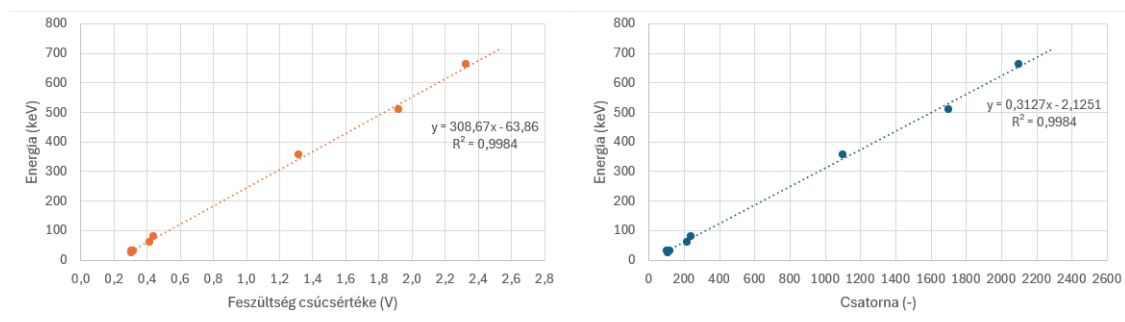
A kalibrációk végzésekor törekedtünk egyezőséget keresni az izotópok bizonyos jellegzetes spektroszkópai karakterisztikái és a mi mérésünk között. A koncepciót jól illusztrálja az ^{241}Am spektruma, ahol azt kerestük, hogy az amerícium jellegzetes alacsony gamma vonalai egyezést mutassanak a mi mérésünkkel.



17. ábra. ^{241}Am mért spektruma 300 sec után darabszám csatornák függvényében

A 216-os csatorna környékén mért maximum összeegyeztethető lenne a 59.5 keV gamma csúccsal, míg a bal oldali alacsonyabb lokális maximum 26.3 keV -hoz (106. csatorna) tulajdonítható.

Oszilloszkópos mérés alapján a Canberra erősítő 2.41-szeresre erősített, a panel kimenetén 2.6 V-on levágás történt, tehát ez felett nem jött csúcs (3.3 V lenne a max). Néhány bekategorizálható csúcs értéke és lineáris illesztés:



18. ábra. Lineáris illesztés

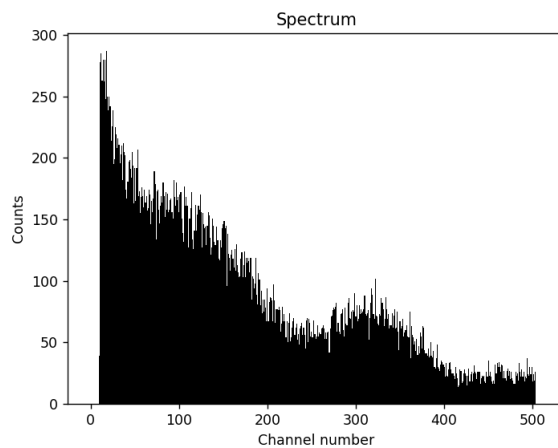
Megjegyzendő, hogy a panelen lévő anyagoknak is vannak jellegzetes gerjesztési tulajdonságai és így bizonyos energia felett például az ónnak (25 keV), az ólomnak (73 keV és 75 keV) megjelenhetnek karakterisztikus röntgen vonalai, amelyeket akár már a ^{133}Ba is gerjeszthetett.

Ezek alapján saccoltuk, hogy a detektor teljes mérési tartománya 0-tól durván 1000 keV -ig terjed. Minden további szűkítést, interpolálást lineárisan kezelünk.

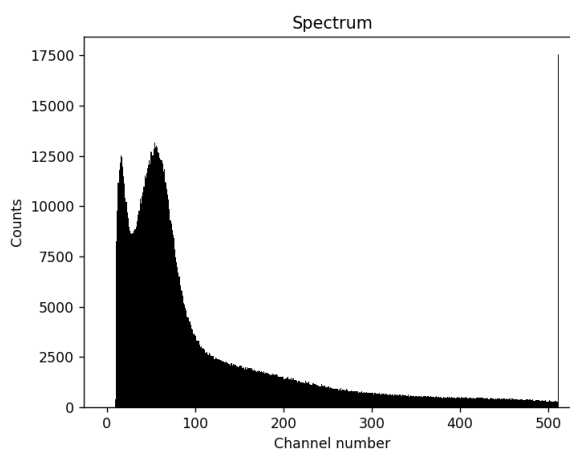
Nagy energiákon azért érkezett relatíve kevés beütés, mivel az inkább áthalad a CsI-on és nem nyelődik el benne. A 200 keV feletti tartomány még inkább bizonytalan és nem mutatja a spektrumok jellegzetességeit a szóródás és egyéb jelenségek miatt. A detektorunk így csúpán a röntgen tartományon mondható érzékenynek.

8.2.2. Tesztelés a szoftver használatba állításával

Májusban már a Szoftver használatával történt a tesztelés. Bár ez még nem a végleges szoftver volt, a csatornaszámok bővítésével sokkal élesebb eredményeket kaptunk az azelőtti kísérleteinkhez képest. A következő két grafikon a teljes mérési tartományon történt mérésekből készült, 512 csatornás felbontáson.



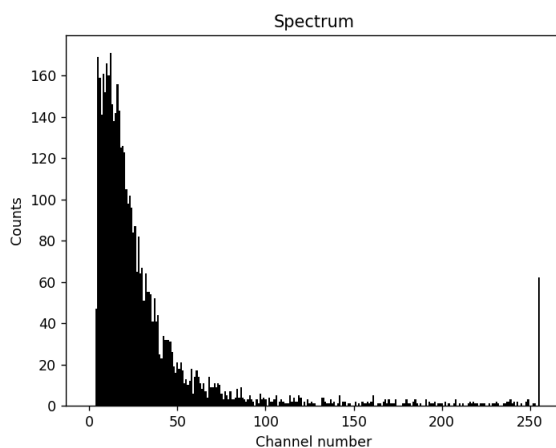
19. ábra. ^{23}Na spektruma, látszódik valami a 511 keV pozitron annihilációból közepén.



20. ábra. ^{152}Eu spektruma

8.3. Háttérérések

A kísérlettel nap-mint-nap történnek a számos háttérérések.



21. ábra. Hat órás éjszakai mérés eredménye

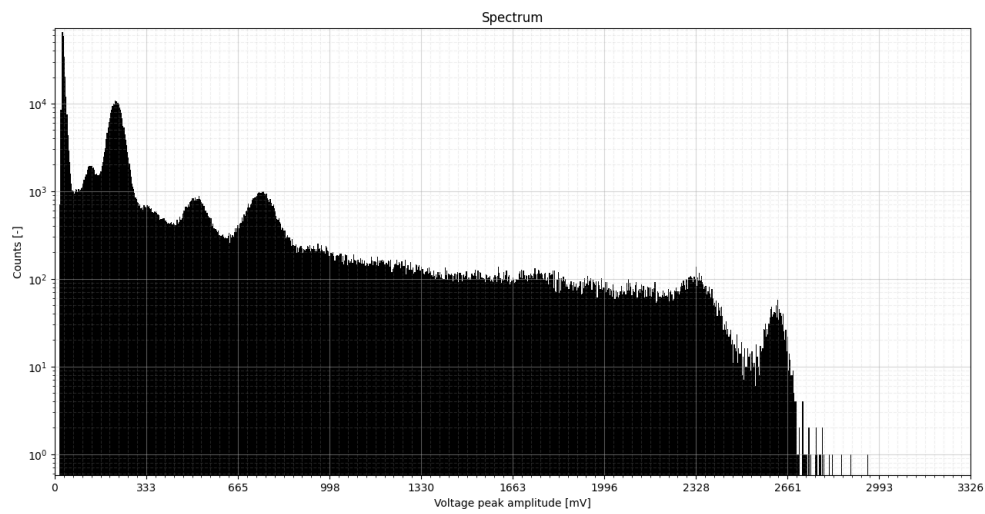
8.4. Gamm spektroszkópia nagyobb térfogatú szcintillátorral

A kísérlet fő limitáló tényezője a kis térfogat és az abba sűrített kis szcintillációs anyag. Nagyobb térfogatú kristályban a nagyobb energiájú és áthatolóképeségű sugárzás is hatékonyabban nyelődik el. Későbbi

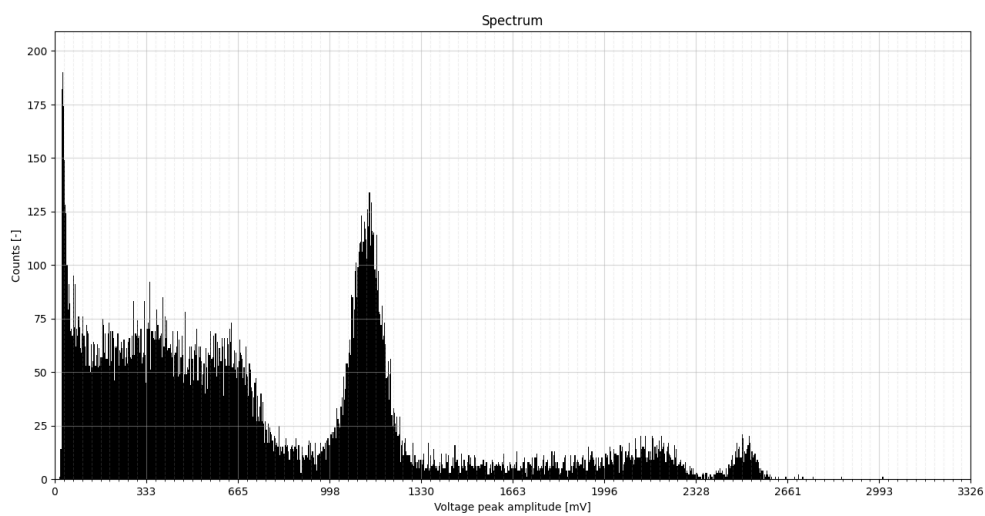
kísérletezés folyamán validálódott az eszköz spektroszkópai képessége, mely a kis detektor térfogattal nem optimális.

Ui.: a mérési tartomány elméleti nullszintje (0 keV) negatív tartományba (közel -100 mV) esne.

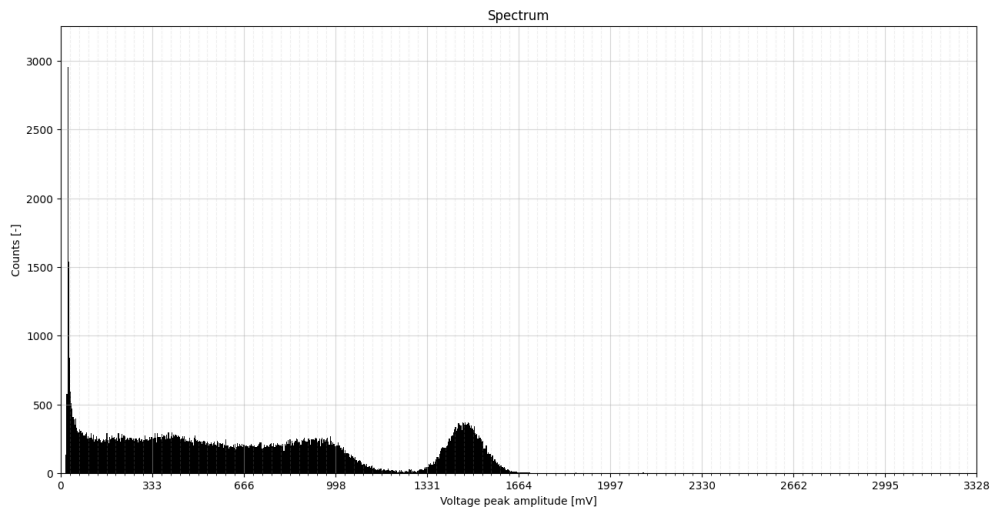
Néhány eredmény:



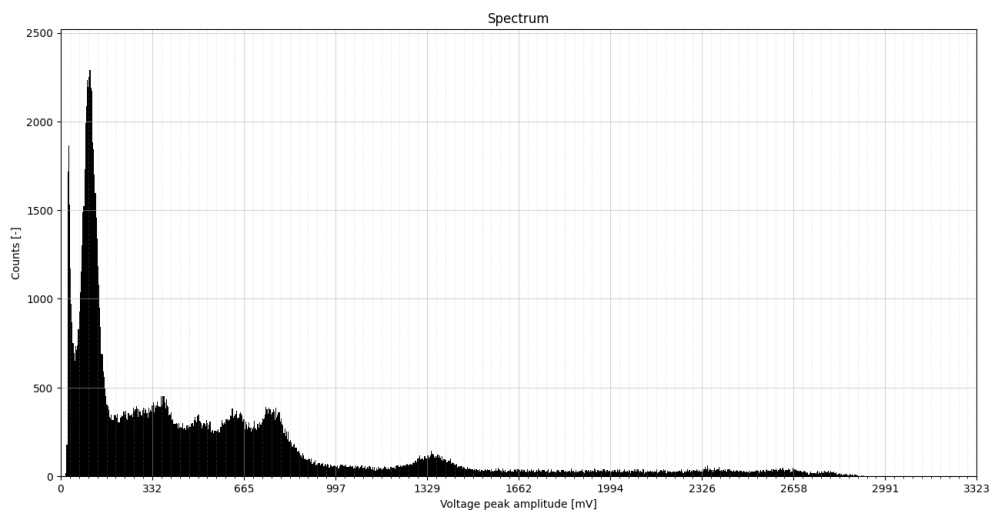
22. ábra. Európium-152 spektruma logaritmikuskálán



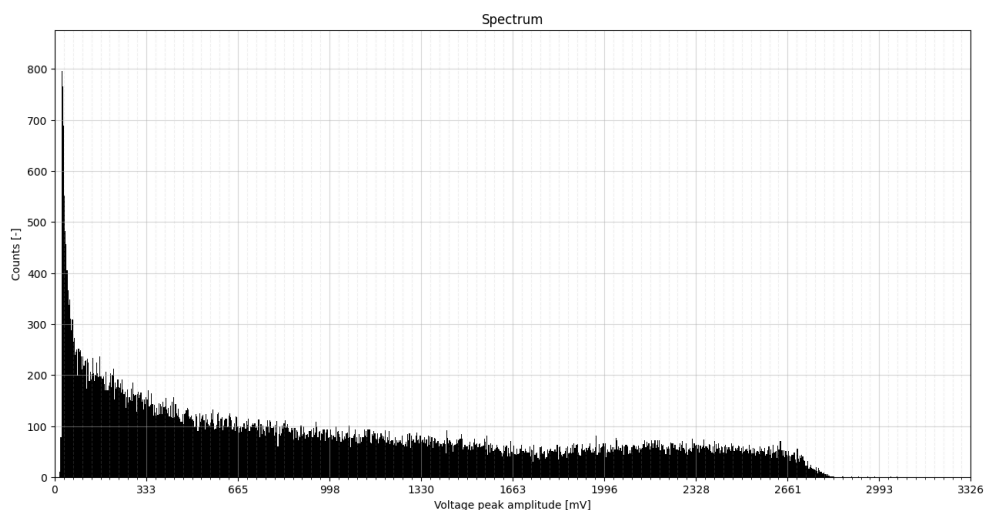
23. ábra. Nátrium-22 spektruma a jellegzetes 512 keV pozitron-elektron annihilációval közepén



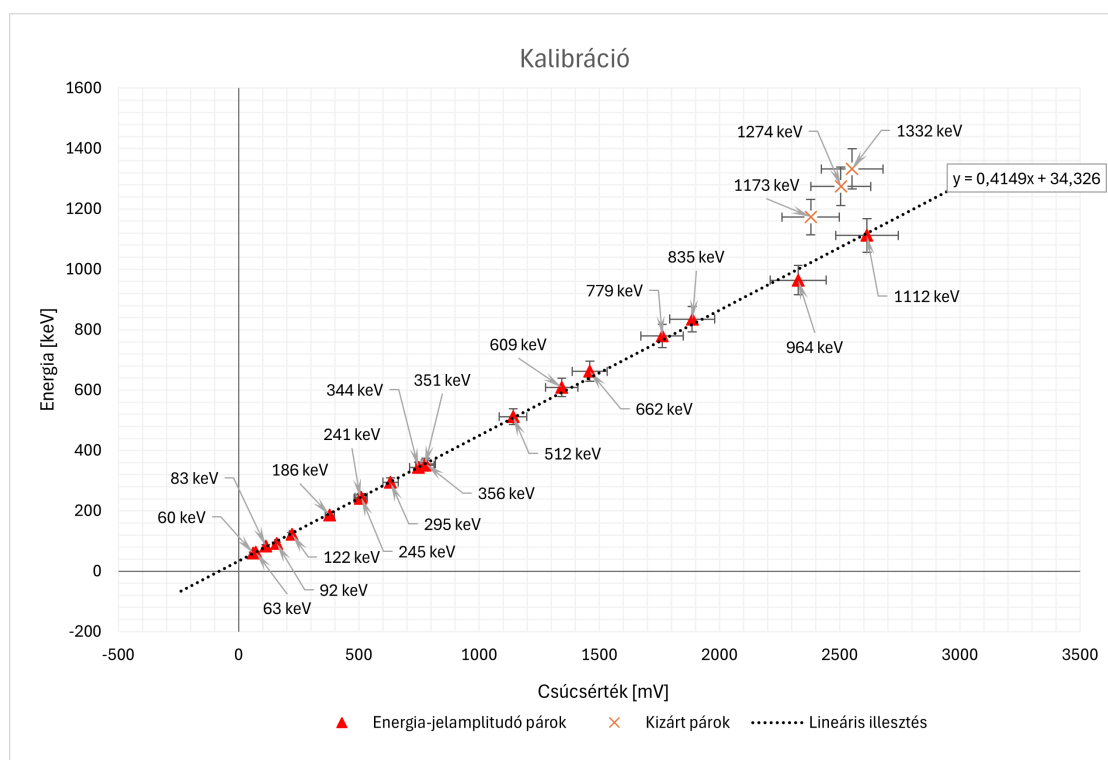
24. ábra. Cézium-137, közepén a 662 keV-es csúccsal, előtte a Compton szóródás tartományával



25. ábra. Rádium-226 és az azzal szekuláris egyensúlyt tartó leánynuklidok spektruma



26. ábra. Stroncium-90, a folytonos spektrum a tisztán béta sugárzás eredménye



27. ábra. Energia-jelamplitudó lineáris illesztés

9. Segédprogramok

9.1. CommandGen tool

Fejlesztés alatt áll egy CLI program C nyelven, melynek segítségével némileg felhasználó barátibbá tesszük majd a parancs írási folyamatot. A program használata nagyon egyszerű, a megértéséhez elég elolvasni ezt a dokumentumot.

A program letölthető a <https://github.com/CeleritasBoard/CommandGen/releases> oldalról.

9.2. Sloth

Sloth egy pythonban írt feldolgozóprogram, mely Windows környezetben megkönnyíti az adatfeldolgozás folyamatát. Elérhetés: <https://github.com/CeleritasBoard/Sloth>