

Säteilyfysiikan tutkiva oppiminen GeigerLog v2.1 ohjelmistolla Raspberry Pi 4 'Bookworm' Debian Linux-ympäristössä

Arvi Hakanen

Helsingin kaupunki, Finland

Tiivistelmä: Nano Smart Sensor -muovituikeilmaisinta testattiin neljällä säteilylähteellä GeigerLog v2.1, Smart Geiger Pro ja Atom Spectra ohjelmistoilla, joista GeigerLog v2.1 pyörii Raspberry Pi 4 'Bookworm' Debian Linux-ympäristössä, kaksi muuta Android-ympäristössä. Pulssitaajuudet CPS, CPM mitattiin Ra-226 oppilastyölähteelle, uraanilasitarkistuslähteelle ja torioidulle TIG-elektrodille GeigerLogilla, pulssinkorkeusspektrit taas Ra-226 oppilastyölähteelle ja torioidulle kaasulampunsukalle Atom Spectralla.

Abstract: Nano Smart Sensor plastic scintillator was tested using four radiation sources using GeigerLog v2.1, Smart Geiger Pro, and Atom Spectra softwares, of which GeigerLog v2.1 runs in the Raspberry Pi 4 'Bookworm' Debian Linux environment, and the two others in the Android environment. Pulse rates CPS, CPM were measured for a Ra-226 source, a uranium glass check source, and a thoriated TIG-electrode using GeigerLog while pulse height spectra for the Ra-226 source and for a thoriated lantern mantle were measured using Atom Spectra.

Asiasanat: tutkiva oppiminen, säteilyfysiikka, Raspberry Pi 4, GeigerLog v2.1

Yhteystiedot: arvi.hakanen@edu.hel.fi

1 Johdanto

Ammattikoulun yhteisten tutkinnonosien matemaattis - luonnontieteellisen osaamisen pakolliset ja valinnaiset osaamistavoitteet vuonna 2022 annetaan ePerusteissa (Perustutkintojen yhteiset tutkinnon osat (YTO), 2022). Pakolliset osaamistavoitteet fysiikka - kemiassa antavat mahdollisuuksia alakohtaiseen integraatioon, mutta ovat toisaalta teoriapainotteiset ja teorian osuutta on voitu lisätä kokeellisuutta karsimalla tai siirtämällä sitä työsaleihin integraation kautta. Opettajan haasteena on yhteisten teoriasisältöjen esittäminen havainnollisesti opiskelijaa kiinnostavalla tavalla ja ammattialan viitekehyksessä. Kirjan sisältöjä on mahdollista valita ja muokata soveltaviksi ja käytännönläheisiksi. Teknisten ammattien fysiikka ja kemia, SanomaPro 2018 ei käsittele lainkaan ionisoivaa säteilyä, vaikka työympäristön monet fysikaaliset ja kemialliset riskitekijät käydään läpi luvussa Hyvä työympäristö. Alkuaineiden tarkastelussa luvussa



Aineita ympärillämme mukana ovat käsitteet atomi, ydin, protoni, neutroni.

Ionisoivaan säteilyyn liittyviä simulaatiotehtäviä olen teettänyt Pelistrategiat ja looginen päättely -nimisellä valinnaisainetoteutuksella (Perustutkintojen yhteiset tutkinnon osat (YTO), 2022). Lisäksi säteilyyn liittyvät loogisen päättelyn harjoitukset ovat mielenkiintoisia ja käytännönläheisiä. Sellaisia voidaan tehdä analogisella geigerlaskurilla ja koulun säteilylähteillä. Motivaatio käsillä olevaan artikkeliin syntyi kuitenkin toisesta paikallisesta valinnaisainetoteutuksesta Virtapiirit ja robotiikka (Perustutkintojen yhteiset tutkinnon osat (YTO), 2022), jossa fysiikka - kemian mittaussautomaatiota rakennettiin käyttäen C++ ohjelmointia Arduino-ympäristössä. Syksyllä 2026 Stadin AO:n paikallista valinnaisainetarjontaa uudistettiin siten, että ohjelmointivalinnaiset jätettiin tarjonnasta pois. Toiminta digitaalisessa ympäristössä (TDY-) valinnainen (Perustutkintojen yhteiset tutkinnon osat (YTO), 2022) sitä vastoin sai jatkua ja työn alla onkin Virtapiirien ja robotiikan oppimateriaalin muokkaus TDY-valinnaisen tavoitteisiin sopivaksi. Raajan ohjelmoinnin sijaan toteutuksen painotus voisi olla enemmän yhteisöllisessä vertaisoppimisessa ja Linux-pohjaisten oppimisympäristöjen ja -alustojen hyödyntämisessä (Raspberry Pi 4, oppilaan oma älypuhelin). Esimerkkinä Nano Smart Sensor (NanoSmartSensor information sheet, 2026) säteilymittauksissa, käytössä ilmaiset ohjelmistot GeigerLog v2.1 (GeigerLog @ SourceForge, 2025), Smart Geiger Pro, Atom Spectra, jolloin digitaalisen toiminnan kontekstina on fysiikka - kemian tutkiva oppiminen ja mittaussautomaatio aikaisempien taideprojektien sijaan.

2 Menetelmät ja materiaalit

Raspberry Pi 4 (raspi) laitteisiin asennettiin uusin 64-bittinen 'Bookworm' Image 16 GB muistikorteilla. Siinä Pythonin versio on 3.13. GeigerLog v2.1 asennuksen vaatima Pythonin minimiversio on 3.10. Asennus tehtiin kotihakemistoon puretusta pakettikokonaisuudesta käsikirjan ohjeen mukaan ja vain yksi asennuksen vaatima Pythonin lisäosa jouduttiin asentamaan erikseen (Raspberry Pi foorumi, 2024) . PYQT6 lisäosan asennuksessa raspin komentoriviin kirjoitetaan syöte:

```
sudo apt install -y cmake  
sudo apt install python3-pyqt6
```

GeigerLog-ohjelmiston asentamiseksi sekä käynnistämiseksi komentoriviin kirjoitetaan rivit:

```
cd GeigerLog //vaihtaa alihakemistoon, jonne asennuspaketit on purettu kotihakemistossa (huom. älä  
käytä purkamiseen oletuksena olevaa /tmp hakemistoa, koska siellä tehty asennus häviää uudelleenkäyn-  
nistyksessä)  
./GeigerLog.sh setup //suorittaa asennuksen  
./GeigerLog.sh //käynnistää ohjelmiston graafisen käyttöliittymän
```

Seuraava vaihe on konfigurointi, johon löytyy myös hyvät ohjeet GeigerLogin manuaalista. Konfigurointi tehdään kirjoittamalla tekstitiedostoon geigerlog.cfg hakemistossa gconfig. Nano Smart Sensor ilmaisinta varten 'AudioCounter' aktivoidaan kirjoittamalla AudioActivation = yes.

Puolijohdepohjainen, pikkusormen pään kokoinen Nano Smart Sensor -muovituikeilmaisoin voidaan liittää älypuhelimien kuulokeliitäntään suoraan tai adapterilla tai sitten usb-äänikortin kautta, jota vaihtoehtoa käytettiin raspien kanssa. Konfigurointitiedosto on aivan oleellinen käytettäessä GeigerLogia, koska siihen viedään mittaasetukset, jotka Android-sovelluksessa (Smart Geiger Pro, Atom Spectra) valitaan asetuksista. Nano Smart Sensor pulssin 'suunnaksi' valittiin negatiivinen. Sopiva diskriminaatiotaso mittauksissa oli 10 % maksimipulssinkorkeudesta.

Tutkitut säteilylähteet:

1. Ra-226, 3 kBq (PHYWE, Saksa)
2. Uraanilasi, tarkistuslähde (Nano Smart Sensor, Ukraina)
3. Torioitu volframi, TIG-elektrodi (Kemppi, Suomi)
4. Torioitu kaasulampun hehkusukka (PHYWE, Saksa)

Ensimmäinen tutkituista säteilylähteistä oli 3 kBq PHYWEn Ra-226 lähde, jota on käytetty Suomessa paljon toisen asteen kouluissa erilaisissa säteilyfysiikan oppilastöissä. Siitä voidaan havaita radiumsarjan (Radioaktiiviset hajoamissarjat) nuklidien alfa-, beeta- ja gammaemissioita. Radiumsarja on sama asia kuin uraanisarja. Wikipedia-artikkelin väliotsikkona on 'radiumsarja', jonka nimen käyttöä ei tarkemmin perustella. Matemaattisesti radiumsarja on uraanisarjan (eli $4n + 2$ sarjan) radiumista alkava osa. Lyhyemmän puoliintumisajan takia uraanin tytärnuklidi ^{226}Ra ($t_p = 1602 \text{ a}$) säteilee paljon enemmän kuin ^{238}U ($t_p = 4,468 \cdot 10^9 \text{ a}$).

Uraanilasia tai -lasitusta on käytetty esimerkiksi oransseissa Fiesta Tableware -astioissa USAssa ja Suomessa ruskeankeltaisissa puhalletuissa lasiastioissa kuten tuhkakupeissa.

Nano Smart Sensor -ilmaisimen suojapakkauksen kannen sisäpuolelle on liimattu pieni keltainen uraasilasin palanen. Se antaa n. kahdeksan audiopulssia kolmen minuutin mittauksessa, kun ilmaisin on liitetty suoraan tai adapterilla audiosisäänmenoon.

Kolmas tutkituista lähteistä oli kimppu 1 mm paksuja torioituja TIG-elektrodeja, josta voidaan havaita toriumsarjan (eli 4n sarjan) nuklidien alfa-, beeta- ja gammaemissioita. Autoalan hitsaustöissä käytettävää TIG-elektrodia voidaan kutsua emanaatiolähteeksi, koska alfoja saadaan paitsi lähteestä myös lähteen ulkopuolelta kaasumaisen radonin emanaation johdosta. Torioitujen TIG-elektrodien pitäminen haalarien rintataskussa voi teoriassa kasvattaa hitsaajan keuhkosyöpäriskiä. Ruostumattoman teräksen hitsauksessa käytettävälle toriumille onkin etsitty säteilemätöntä korvaajaa lantanidiyhdisteistä.

Volframielektrodi kuluu hitsatessa vain vähän eikä toisella kädellä syötettävässä täyteaineessa ole toriumia, joten hitsaustuotteeseen toriumia jää vähän. Hitsauskohteen mukaan elektrodin pää voidaan muotoilla sopivaan muotoon kynänteroittimen tapaisella teroituslaitteella eikä eri kohteita varten tarvita välttämättä sarjaa eripaksuisia elektrodeja. Seostamalla (sintraamalla) volframiin muutamia prosentteja toriumoksidia TIG-hitsauksessa käytettävän elektrodin pintalämpötilaa saadaan pienennettyä, koska toriumilla on volframia alempi valosähköilmiön työfunktio. Terminen oksidaatio vähenee ja ruostumattoman teräksen hitsaustulokset paranevat. Tässä elektrodin seostamisen vaikutus ulottuu pintaan asti samalla tavalla kuin ruostumattoman teräksen seostamisen vaikutus ulottuu sen pintaan asti.

Hardy Simgenin kokouspaperissa (Simgen, H., Radon emanation suppression by surface coating, TAUP, Vienna, 2023) tutkitaan erilaisia pinnoitusmenetelmiä, joilla TIG-elektrodin tai muiden luonnonnuklideja sisältävien säteilylähteiden radonemanaatiota voidaan vähentää (lähteiden käyttötarkoitus on tässä muu kuin ruostumattoman teräksen hitsaus). Esityksessä torioitu TIG-elektrodi, 'ensimmäinen metallinen emanaatiolähde', on tärkeä referenssi, kun tavoitellaan emanaatiosuppressoituja lähteitä, joissa radonemanaatio ei vääristä tavoiteltua toriumin (tai radiumin) tytärnuklidien teoreettista tasapainoa.

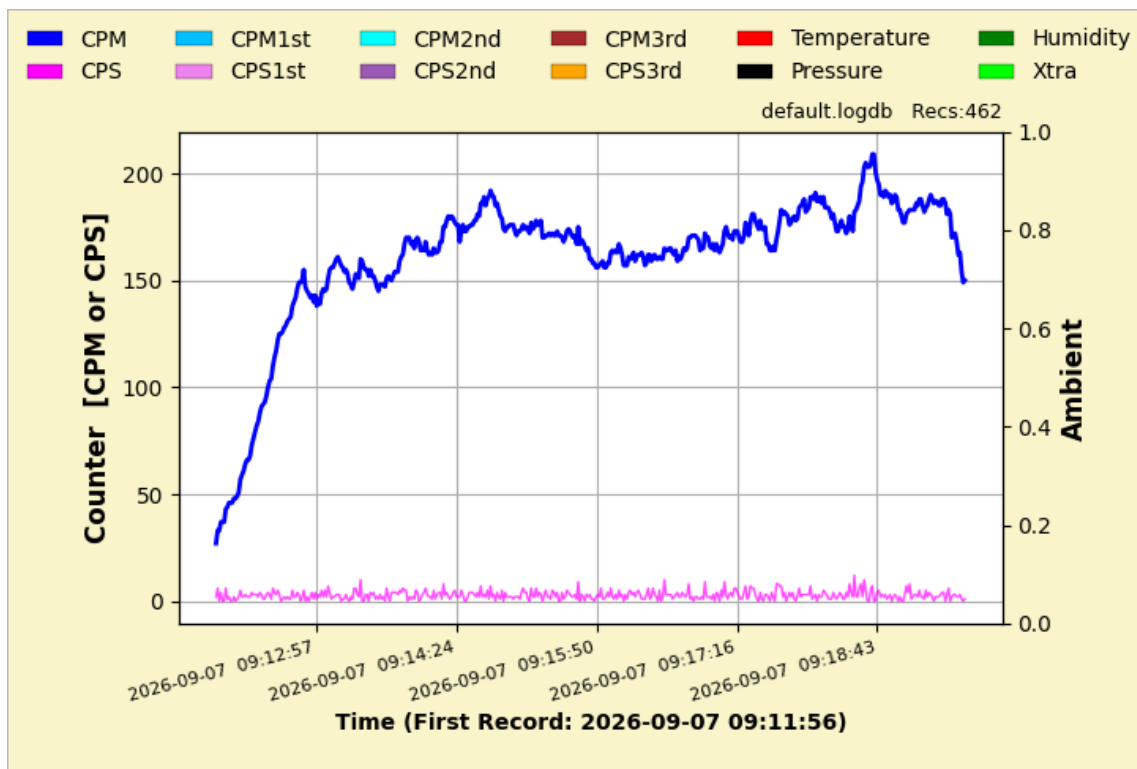
Ennen mittausten aloittamista laskin lukiotason laskuna minkä verran aktiivisuutta olisi odotettavissa TIG-elektrodista. Yksityiskohtaisempi lasku esitetään viitteessä ja fysiikkaan orientoitunut lukija voi käydä sen sieltä läpi (Ruark, R. Detecting Alpha Particles from Thorium Decay, 2022). Totean vain, että päädyin likimain samaan tulokseen (muutamia hajoamisia minuutissa), vaikka oletin metallisen toriumin enkä laskenut geometrasta tekijää integroimalla.

Neljäs tutkittu lähde on torioitu kaasulampun hehkusukka, jossa on paljon enemmän becquerellejä kuin TIG-elektrodeissa. Siitä oli mahdollista mitata toriumin beeta -gamma-spektri Nano Smart Sensor -ilmaisimella ja Atom Spectralla.

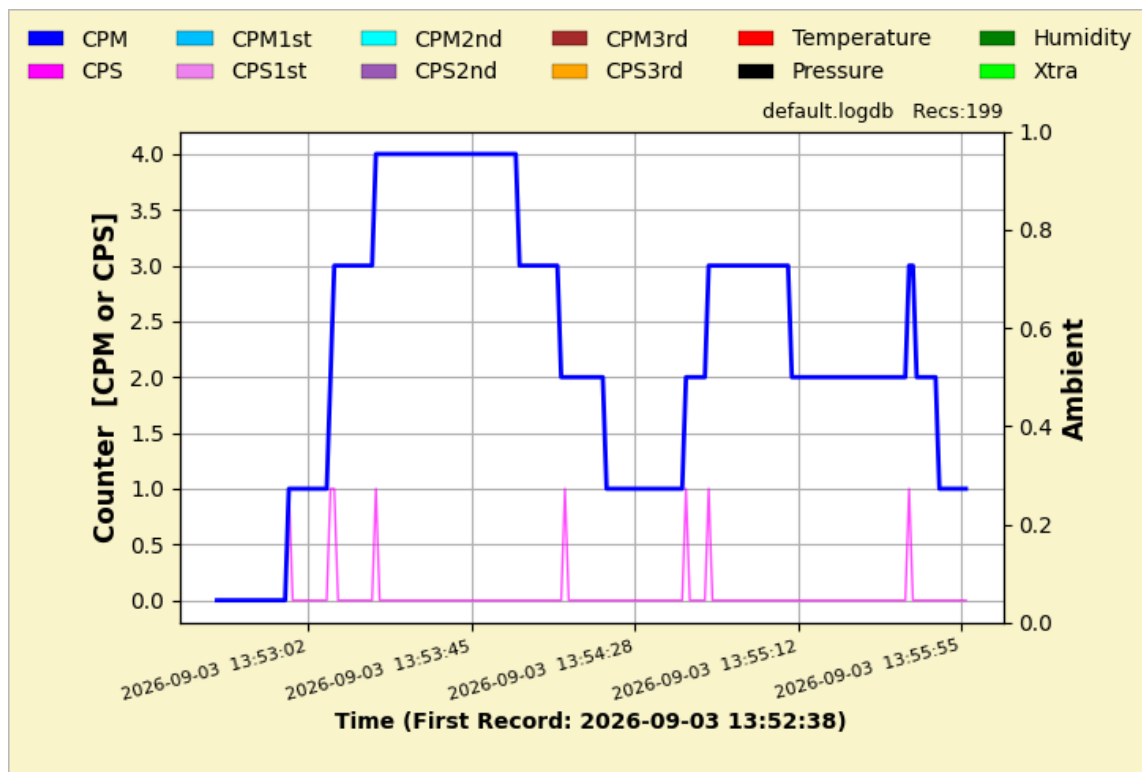
3 Tulokset ja pohdinta

Kuvissa 1–3 esitetään Nano Smart Sensor -muovituikeilmaisimella ja GeigerLogilla mitatut pulssitaajuudet kolmella säteilylähteellä muutaman minuutin mittauksissa. Radiumlähteellä (aktiivisuus 3 kBq) mitattu pulssitaajuus on 150 - 200 CPM siinä, missä uraanilähteellä tai toriumlähteellä mitattu pulssitaajuus on välillä 1 - 4 CPM. Tästä voidaan päätellä, että Nano Smart Sensor -uraanilasitarkistuslähteen tai toriodun TIG-elektrodin aktiivisuus on < 60 Bq. GeigerLog ohjelmistossa voidaan asettaa kalibrointikerroin, annosnopeuden $\mu\text{Sv/h}$ ja pulssitaajuuden CPM välille.

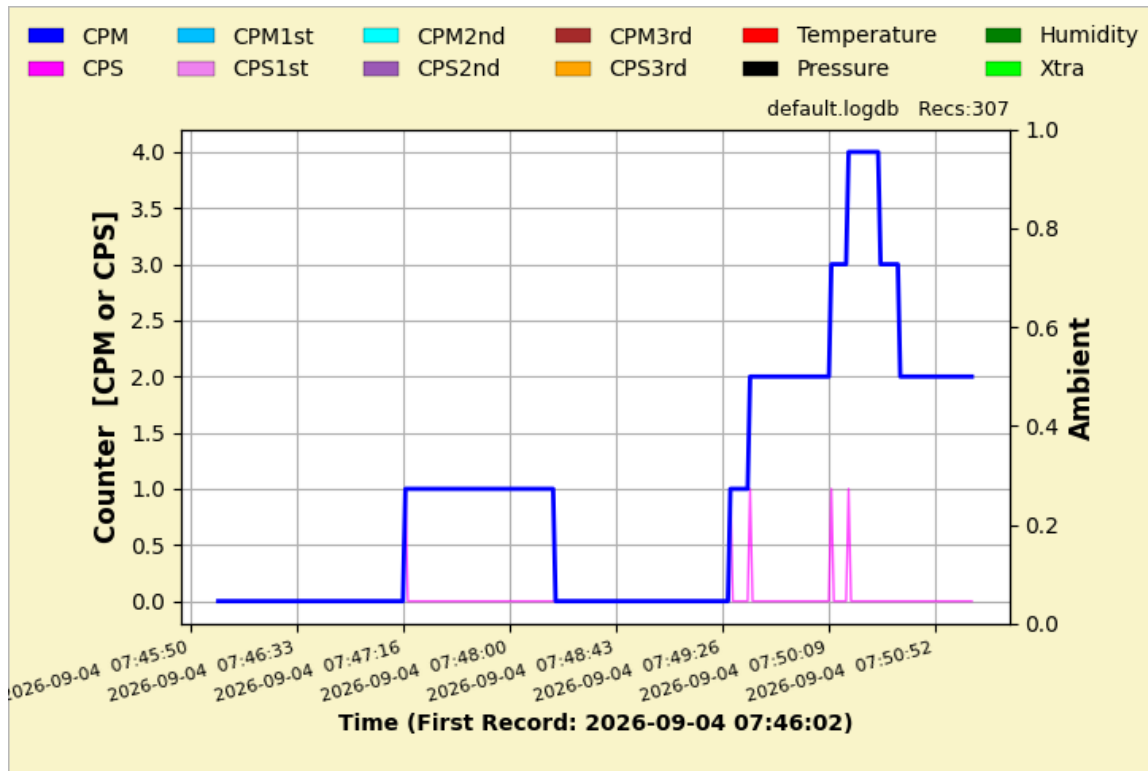
Kuva 1. GeigerLogilla mitatut radiumlähteen pulssitaajuudet CPS ja CPM noin kuuden minuutin mittauksessa. Ra-226, 3 kBq (PHYWE, Saksa).



Kuva 2. GeigerLogilla mitatut uraanilähteen pulssitaajuudet CPS ja CPM noin kolmen minuutin mittauksessa. Uraanilasi, tarkistuslähte (Nano Smart Sensor, Ukraina).

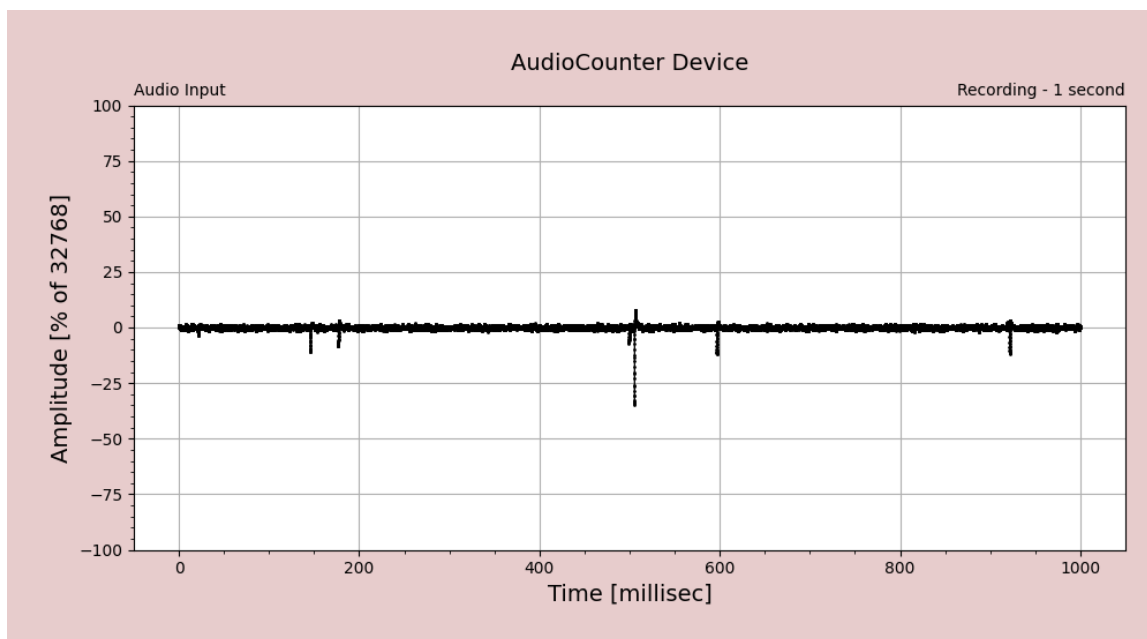


Kuva 3. GeigerLogilla mitatut toriumlähteen pulssitaajuudet CPS ja CPM noin viiden minuutin mittauksessa. Torioitu volframi, TIG-elektrodi (Kemppi, Suomi).

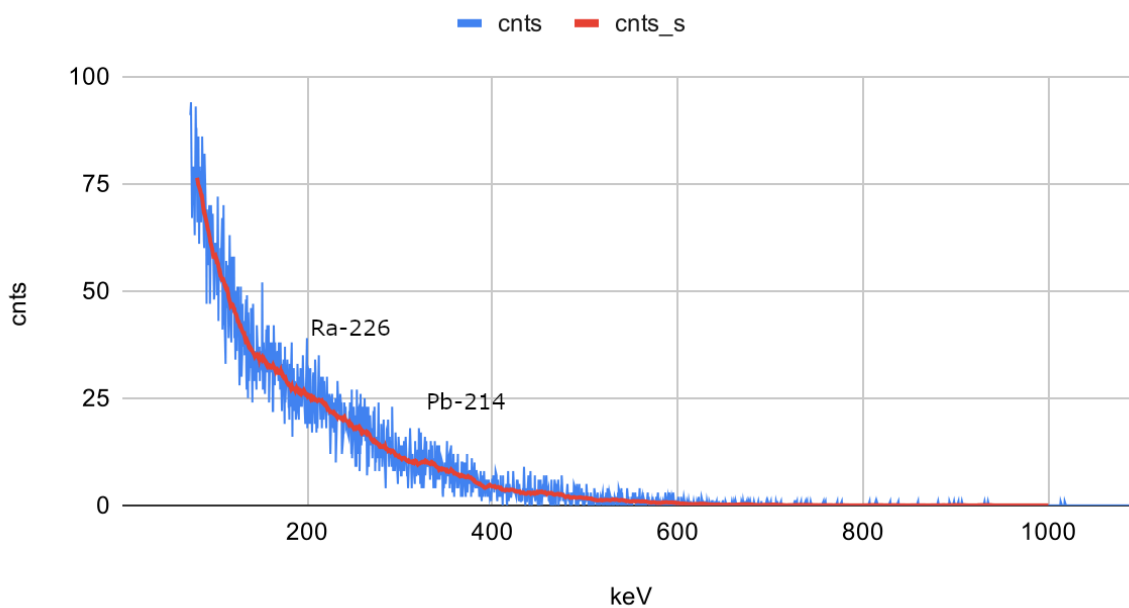
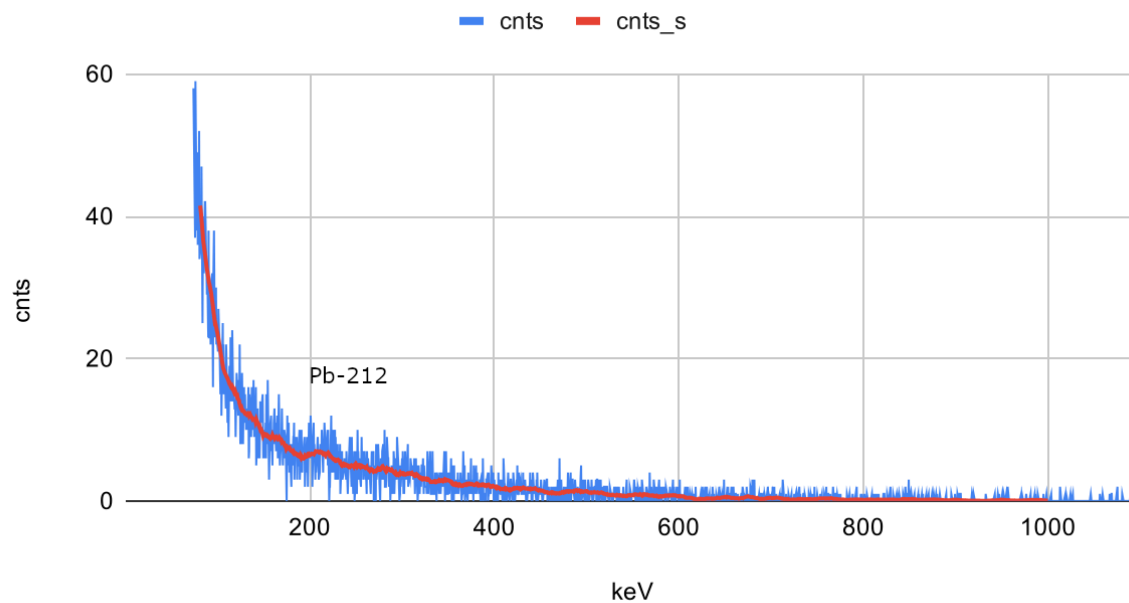


Kuvassa 4 esitetään Nano Smart Sensor -muovituikeilmaisimen pulssikuvaaja yhden sekunnin aikana. Siinä näkyy muutamia eri korkuisia pulsseja. Lisäksi huomataan, että pulssin suunta on negatiivinen, pulssit suuntautuvat alaspäin. Muovituikeilmaisimen tuottaman audiopulssin korkeus on verrannollinen ilmaisimeen absorboituvan gammafotonin ja/tai elektronin energiaan. Tämä tekee mahdolliseksi mitata ja analysoida ilmaisimella työssä käytettävien säteilylähteiden beeta – gammaspektrejä (pulse height spectra).

Kuva 4. GeigerLogilla ja radiumlähteellä mitattu Nano Smart Sensor -ilmaisimen pulssikuvaaja yhden sekunnin aikana. Ra-226, 3 kBq (PHYWE, Saksa).



Kuvissa 5–6 esitetään Nano Smart Sensor -muovituikeilmaisimella ja Atom Spectralla mitatut spektrit kahdella säteilylähteellä muutaman tunnin mittauksissa. Spektrimittauksissa yksi saavutus on jo se, että kahdelle nuklidille saadaan yksilölliset energiaspektrit, joissa on fotopiikkejä ja energiakalibrointi on melko hyvin kohdallaan. Gammaspektrien referenssinä voidaan käyttää (Gamma Spectrum Database) spektrejä radiumille, toriumille. Nuklidin tunnistamisessa (radium vs. torium) oleellisia ovat ao. hajoamissarjan lyijyisotooppien piikit, jotka olen havainnut ja merkinnyt kuviin 5–6.

Kuva 5. Atom Spectralla mitattu radiumlähteen spektri. Ra-226, 3 kBq (PHYWE, Saksa).**Kuva 6.** Atom Spectralla mitattu toriumlähteen spektri. Torioitu kaasulampun hehkusukka (PHYWE, Saksa).

Pohdinnassa on syytä muistaa, että Nano Smart Sensor -ilmaisimella on herkkä paitsi gammafotoneille, n. 50 keV energiasta alkaen, myös beetalle ja että tutkitut nuklidit ovat sekä beeta- että gammasäteilijöitä. Beetasäteily muodostaa spektriin jatkuvan taustan, jonka päällä mahdolliset fotopiikit 'ratsastavat'. Puhtaan beetasäteilijän (Sr/Y) spektrissä ei näy lainkaan fotopiikkejä (Sadigov, A., et al., 2023). Pitkässä mittauksessa radiumlähteen spektriin alkaa syntyä rakennetta, jonka saa paremmin näkyviin ottamalla liukuvan

keskiarvon, esim. 40 kanavaa kun koko mittausalue on 4000 kanavaa (Kuvissa 5–6 punaiset pisteistöt otsikolla cnts_s). Tämän datankäsittelyn tein Google Sheets ohjelmassa, johon noudin Android-puhelimella Google Driveen tallentamani tekstimuotoiset spektrit. Sama menettely tuotti onnistumisen myös toriumsukan pitkässä mittauksessa – voidaan arvioida, että spektrin mittauksen edellytys tällä ilmaisimella on vähintään suuruusluokkaa 1 kBq oleva lähteen aktiivisuus.

Atom Spectrassa energiakalibrointi on 0,366 keV/kanava, jolloin 1000 kanavaa merkitsee 366 keV. Spektrinmittauksissa pulssinkorkeuden kynnysarvo asetettiin kohtaan 150 kanavaa, jolloin 55 keV alapuolella ei näy mitään, missä muuten näkyisi korkea kohinapiikki. Muovituikemateriaali on low-Z materiaali, josta korkeamman energian gammat sujahtavat läpi jättämättä tuikahdusta. Siitä seuraa suhteellisen jyrkästi hiipuva energiavaste. Nuklidin tunnistaminen spektristä on tällöin tehtävä välillä n. 100 keV – 400 keV. Fotopiikit ovat leveitä, mikä on yleinen ominaisuus kaikilla tuikeilmaisimilla huoneen lämpötilassa. Kannattaa lisäksi muistaa, että Nano Smart Sensor -ilmaisimen hinta oli 50 euroa siinä missä isomman ja herkemmän NaI/Tl -ilmaisimen hinta olisi vähintään kymmenkertainen.

4 Johtopäätökset

Ukrainassa valmistettu Nano Smart Sensor -muovituikeilmaisim osoitti kenttäkelpoisuutensa ja voin suositella sitä lukio- ja ammatillisen koulutuksen lisäksi myös käytettäväksi yläkoulun fykessä, demovälineenä ja tutkivan oppimisen työkaluna. Sillä onnistuvat paitsi pulssitaajuusmittaukset Raspberry Pi 4- ja Android-ympäristöissä myös matalan resoluution beeta - gammaspektrin mittaus oppilastöissä käytettävillä säteilylähteillä. Säteilyfysiikan tutkiva oppiminen on yksi hyvä vaihtoehto, kun etsitään aiheita 'toimintaan digitaalisessa ympäristössä', paikallisessa TDY-valinnaisessa Stadin AO:ssa. Tässä työssä esiteltyt ohjelmistot GeigerLog ja Atom Spectra tarjoavat matalan kynnyksen mahdollisuuden mafiye-opettajalle rakentaa yhdessä oppilaiden kanssa alakohtaisestikin integroituvaa mittausautomaatiota nykyaikaisessa digitaalisessa toimintaympäristössä.

Viitteet

- Gamma Spectrum Database <https://www.gammaspectacular.com/blue/gamma-spectra>
- GeigerLog @ SourceForge (2025) <https://sourceforge.net/projects/geigerlog/>
- NanoSmartSensor information sheet (2026) <https://www.ebay.com/itm/174488547429>
- Perustutkintojen yhteiset tutkinnon osat (YTO) (2022), ePerusteet, OPH-456-2022.
<https://eperusteet.opintopolku.fi/#/fi/toteutussuunnitelma/5207115/ammattillinen/tiedot>
- Radioaktiiviset hajoamissarjat https://fi.wikipedia.org/wiki/Radioaktiiviset_hajoamissarjat
- Raspberry Pi foorumi (2024) <https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?t=375351>
- Ruark, R. Detecting Alpha Particles from Thorium Decay (2022).
http://robruark.com/other/Radiation/thoriated_welding_rods/thorium.html
- Sadigov, A., et al. (2023) Performance of a plastic scintillator developed using styrene monomer polymerization Preprint submitted to Radiation Measurements
<https://arxiv.org/pdf/2309.06878>
- Simgen, H., Radon emanation suppression by surface coating, TAUP, Vienna (2023)
https://indico.cern.ch/event/1199289/contributions/5449632/attachments/2703469/4692729/simgen_taup_2023.pdf