

# KÖRNYEZETI MINTÁK GAMMA-SPEKTROMETRIÁS VIZSGÁLATA

Kocsonya András

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, 1221 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

kocsonya.andras@ek.hun-ren.hu

A kézirat beérkezett: 2024.06.06.

Közlésre elfogadva: 2024.07.09.

*Gamma-spectrometry is a widely used analytical method for radiological analysis of environmental samples. The general features of the method, instrumentation, analytical potentials, limitations are discussed focusing on environmental monitoring. The new developments at the Centre for Energy research are presented in the field of gamma-spectrometry applications in environmental monitoring.*

*Keywords: environmental monitoring, gamma-spectrometry, sampling, analysis, radiation protection*

Környezeti minták radiológiai elemzésének egyik elterjedt analitikai módszere a gamma-spektrometria. Áttekintjük a gamma-spektrometria általános jellemzőit, műszerezettségét, lehetőségeit, korlátait különös tekintettel a környezetellenőrzés területén való alkalmazásra. Bemutatjuk az Energiatudományi Kutatóközpontban a gamma-spektrometria környezetellenőrzési célú alkalmazása területén az elmúlt évtized fejlesztéseit.

Kulcsszavak: környezetellenőrzés, gamma-spektrometria, mintavétel, analízis, sugárvédelem

## ELŐSZÓ

Jelen cikk a XLIX. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyamon (Szeged, 2024. április 16–18.) az „ismeretfelújító blokk” keretében elhangzott előadás írott változata. Az előadás tartására Deme Sándor (1936 – 2024), a Sugárvédelmi Szakcsoporthjának (ma Szakosztály) alapító tagja, majd egy ideig elnöke, a KFKI Sugárvédelmi főosztályának nyugalmazott, de haláláig igen aktív munkatársa kért meg. Az előadás témáját és címét is ő tűzte ki, de az idei konferenciát sajnálatosan már nem érte meg. Az előadást és a belőle készült cikket Deme Sándor emlékének ajánlom.

## BEVEZETÉS

Sugárveszélyes tevékenységet folytató munkahelyek, a nukleáris létesítmények és a nyitott radioaktív izotópokkal dolgozó laboratóriumok üzemeltetése során nem zárható ki kisebb-nagyobb mennyiségű radioaktív anyag kijutása a környezetbe. Emiatt a sugárveszélyes létesítmény működése miatt nem csak az ott dolgozókat érheti sugárterhelés, hanem a szűkebb-tágabb környezetet és az ott élő lakosságot és élővilágot is [1].

A sugárvédelem hármas alapelve alapján természetesen a létesítményben dolgozók és a sugárveszélyes létesítmény közelében élő lakosság sugárterhelését egyaránt a dóziskorlátokon

belül, az ésszerűen elérhető legalacsonyabb szinten kell tartani. Ez a többlet sugárterhelés a létesítmények normál üzeme során nagyon alacsony – jellemzően nagyságrendekkel kevesebb, mint a természetes háttérsugárzás ingadozása –, emiatt közvetlen mérésekkel esélytelen kimutatni. A létesítmény működéséből származó többlet sugárterhelést emiatt közvetett módszerrel lehet meghatározni. A környezeti hatások ellenőrzéséhez azonosítani kell a lehetséges kibocsátási útvonalakat, majd a terjedési utak mentén a mérési, illetve mintavételi pontokat és módszereket úgy érdemes megválasztani, hogy a meghatározandó adatokat a szükséges pontossággal és lefedettséggel meg lehessen adni. A sugárterhelést közvetett úton, a kibocsátások, a környezeti dózisteljesítmények, illetve a radioaktív anyagkoncentrációk mérése alapján számítással lehet meghatározni. [8, 9, 11]

A sugárveszélyes tevékenységet folytató – ezen belül a nukleáris – létesítmények környezetellenőrzésének három fő feladata van [2]:

1. a létesítmény tevékenységéből származó sugárterhelés meghatározása a dolgozókra és a létesítmény környezetében élő lakosságra,
2. a létesítményre és környezetére vonatkozó sugárvédelmi kritériumok teljesülésének mérésekkel történő igazolása,
3. rendkívüli esemény bekövetkezése esetén adatszolgáltatás az optimális védelmi intézkedésekhez.

## **GAMMA-SPEKTROMETRIA A KÖRNYEZETELLENŐRZÉSSEN**

Radiológiai és nukleáris létesítményekben keletkező, illetve feldolgozott radionuklidok elég jelentős része gamma-sugárzó. Ezek jellemzően, alfa- vagy béta-bomlással vagy elektronbefogással bomlanak és a radioaktív bomlást követő legerjesztődés során keletkezik a gamma-sugárzás. A kibocsátott gamma-sugárzás energiája a bomlás során keletkező leánymag energiaszintjei közötti energiakülönbségnek felel meg. Kvantummechanikai kiválasztási szabályok határozzák meg az energiaszintek közötti lehetséges átmeneteket, ezek intenzitásai pedig az egyes energiaszintek populáltságától és az átmeneti valószínűségektől függenek. Emiatt a gamma-sugárzás energiaspektruma diszkrét, azaz határozott energiájú emissziós vonalakkól áll, amelyek intenzitásaránya kötött. Gyakorlatban az egyes radionuklidokra a gamma-emissziós energiákat és az egy bomlás során kibocsátott fotonok arányát táblázatok, illetve online adatbázisok tartalmazzák [3].

### ***A gamma-spektrometria alkalmazási köre***

A környezetellenőrzésben a gamma-spektrometria igen sokfajta mintatípusra alkalmazható [4]. Az egyik leggyakoribb feladat a levegő aktivitás-koncentrációjának mérése. A levegőben levő, radioaktivitást hordozó anyagok mintavétel után mérhetők: aeroszol, illetve elemi és szerves jód a megfelelő szűrőn keresztül szivattyúzással mintázhatók. Nemesgázok kevésbé mintázhatók, azokat közvetlenül szokás mérni.

A légköri kihullás (fall-out) meghatározása általában a mintavevő oldat bepárlása után történik.

További környezeti elemek, amit gyakran mérünk gamma-spektroszkópiával [5,6]:

- talajminták, felszíni és felszín alatti vizek;
- indikátornövények (fű, moha, gomba, fa);
- fák évgyűrűi – hosszabb időskálájú retrospektív monitorozás céljából);
- élelmiszerek, élelmiszer-nyersanyagok (tej, hús, hal – a fogyasztási szokások szerint);
- takarmányozásra használt növények;
- üledékek.

Vízminták vizsgálata történhet közvetlenül vagy bepárlás után. A közvetlen mérés előnye, hogy nincs szükség mintaelőkészítésre. Azonban a vízben lebegő anyagok ülepedése befolyásolja a pontosságot. Bepárlással történő mintaelőkészítés után általában jobb kimutatási határ érhető el.

A leírt mintavételt követő laboratóriumi méréseken túl vannak olyan méréstípusok, amikor a detektor is a mintavétel helyén van és folyamatosan mér. Ilyen például a létesítményt elhagyó szennyvíz aktivitás-koncentrációjának folyamatos mérése egy áramlás útjába merülő gamma-detektorral vagy a levegő-monitorozó rendszerek szűrőit folyamatosan mérő detektor. Ezek célja elsősorban a gyors riasztás abban az esetben, ha valami lényeges aktivitásemelkedés történne a figyelt közegben.

### ***A gamma spektrometria előnyei***

A gamma-spektrometria viszonylag kevés mintaelőkészítést igényel. A gamma-fotonon áthatolóképesége viszonylag nagy. Emiatt a 100 keV alatti energiatartomány kivételével szokásos méretű minták esetén a minta önabszorpciója általában nem jelentős. Emiatt tömbi anyagok, vastag minták is különösebb előkészítés nélkül mérhetők. Gyors tájékozódás céljából a legtöbb környezeti anyag előkészítés nélkül mérhető. Pontosabb mérésekhez homogenizálás, illetve tömegállandóságig történő szárítás szükséges.

Gamma-spektrometriai méréssel általában egy méréssel a mintában található valamennyi gamma-sugárzó radionuklid megmérhető. A jó kimutatási határ eléréséhez azonban viszonylag hosszú mérési időkre van szükség. A környezetellenőrzés gyakorlatában az egy éjszakás mérési idők teljesen általánosak, így naponta egy minta mérhető meg egy spektrométerrel.

### ***A gamma-spektrometria korlátai***

Nem mérhetők gamma-spektrometriával a csak béta-sugárzó radionuklidok (pl.  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ). Utóbbinál megjegyzendő, hogy a  $^{90}\text{Sr}$  bomlástermékének, a  $^{90}\text{Y}$ -nak van egy igen kis intenzitású gamma vonala, de annyira gyenge, hogy környezeti minták esetén gyakorlatban nem tudjuk detektálni.

Szintén rosszul mérhetők gamma-spektrometriával azok a radionuklidok, amelyeknek jellemzően kis energiájú, illetve alacsony relatív gyakoriságú gamma-vonalaik vannak. Sajnos a természetes bomlási sorok tagjainak többsége is ide tartozik, de szerencsére valamennyi bomlási sorban van néhány gamma-spektroszkópiával is jól mérhető radionuklid.

A KFKI-telephelyen rendelkezésre álló alacsony háttérű gamma-spektrometriai mérőhelyeken a szokásos gamma-sugárzó radionuklidok többségére néhányszor 10 mBq kimutatási határ érhető el egy éjszakás mérési idő esetén.

Egymáshoz közel eső gamma-vonalak esetén a nuklidazonosítás és mennyiségi analízis bizonytalanná válhat. Ilyen például a  $^{226}\text{Ra}$  186,2 keV-es és a  $^{235}\text{U}$  185,7 keV-es vonalának átfedése, ahol a két energia különbsége (0,5 keV) jellemzően kisebb, mint a detektorok energiafelbontása (1. táblázat). Ilyenkor lehetőség szerint egy másik, nem átfedő vonalat érdemes választani. A fenti esetben erre az  $^{235}\text{U}$ -nál van lehetőség, mert 143,8 keV-nél is van egy másik gamma-vonala, bár intenzitása csak körülbelül ötöde az előbbinek. A  $^{226}\text{Ra}$ -nak viszont ez az egyetlen mérhető gamma-vonala, mivel a többi vonali nagyságrendekkel kisebb intenzitásúak, környezeti méréseknél gyakorlatban nem kimutathatók.

1. táblázat. A  $^{226}\text{Ra}$  és a  $^{235}\text{U}$  gamma-vonalai

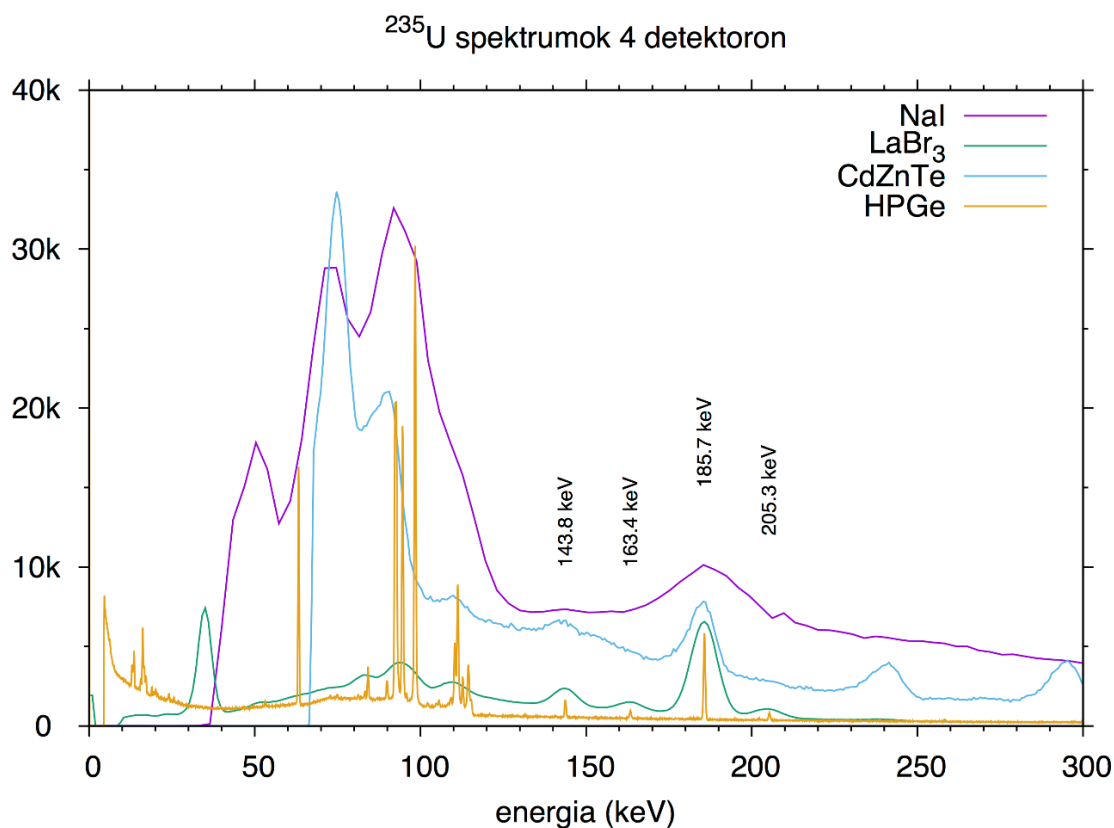
(a) $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$		(b) $^{235}\text{U} \rightarrow ^{231}\text{Th}$	
$T_{1/2} = 1600$ év		$T_{1/2} = 7.04 \times 10^8$ év	
energia (keV)	gyakoriság (%)	energia (keV)	gyakoriság (%)
186.211	3.59	109.16	1.54
		143.746	10.96
		163.358	5.08
		185.712	57.2
		205.309	5.01

### A gamma-spektrometria eszközei

A gamma-sugárzás detektálásának lényeges mérföldköve volt a szcintillációs detektorok megalkotása a huszadik század elején, mert ezekkel az érzékszerveinkkel nem észlelhető gamma-sugárzást látható fénné lehet konvertálni [5]. Másik nagy lépés a fotoelektron-sokszorozó megalkotása volt az 1940-es években, amivel a korábbi fásasztó szabad szemmel való detektálást elektronikus eszközökkel lehetett kiváltani. A spektrumok felvételére az 1960-as évektől szokásos a sokcsatornás analizátorok használata. Olyan esetekben, amikor egy konkrét radionuklid monitorozása a feladat, a kiválasztott gamma-vonalra ráállított egycsatornás analizátorral is lehet mérni. Legelterjedtebbek a NaI szcintillátorok, amelyek a különféle mérési feladatokhoz igen változatos méretben és formában érhetőek el. A szcintillációs detektorok fejlesztése máig is folytatódik. Újabb szcintillátor-anyagokkal, pl. LaBr jobb energiafelbontás és alacsonyabb háttér érhető el. A szcintillációs detektorok további előnye, hogy nem igényelnek működésük során hűtést.

A gamma-spektrometria jelentős fejlődését hozta az 1960-as évektől a félvezető detektorok megjelenése [6]. Ezek lényegesen jobb energiafelbontásra képesek, mint a szcintillációs detektorok. Emiatt sokkal összetettebb, több radionuklidot egyidejűleg tartalmazó minták is

eredményesen mérhetők vele. Bár a félvezető detektorok eléggé drágák (10 000 EUR-tól felfelé) mostanra ezek, elsősorban a nagy tisztaságú germánium (HPGe) lettek a gamma-spektrometria alapvető laboratóriumi eszközei. A HPGe detektorok üzemeltetésük során cseppfolyós nitrogén hűtést igényelnek. Az elmúlt évtizedben megjelentek a hibrid hűtésű detektorok, amiben Stirling-ciklusú hűtőgéppel folyamatosan visszahűtik a keringő cseppfolyós nitrogént. Más típusú félvezető detektorok is megjelentek, mint a CdZnTe detektorok, amelyek gyengébb felbontásúak ugyan, mint a HPGe detektorok, de a szcintillációs detektorokhoz hasonlóan nem igényelnek hűtést. További előnyük, hogy igen kicsi méretű detektorok készíthetők belőlük olyan alkalmazásokhoz, ahol ez számít, pl. atomreaktorok fűtőelemeinek központi csatornájába bedugható méretű. Az 1. ábrán ugyanazon uránminta gamma-spektrumát látjuk négy különböző detektorral felvéve.



1. ábra. Uránminta spektruma négy detektoron

A HPGe detektorkristályok változatos méretekből és kivitelben érhetők el, amit a mérési célnak megfelelően érdemes megválasztani. Kiseb energiák mérésére a planár detektorok használatosak, mert itt a kisebb áthatolóképesség miatt a detektorkristály felszíne közelében történik a legtöbb kölcsönhatás. Nagyobb energiák esetén jobb hatásfokú nagyobb kristályok esetén a koaxiális elektródarendezés vált be. Általában a kristály méretének növekedésével növekszik az ár is, de nagyobb kristályok esetén az energiafelbontás csökkeni szokott, illetve a töltésgyűjtési idő meghosszabbodása miatt az időfelbontás, illetve a számlálási sebesség rosszabb. A fejlesztések eredményeként vannak széles energiaspektrumú (broad energy range) detektorok, amelyek néhány keV-től néhány MeV energiáig elég jól használhatók. Kis méretű

és kis aktivitású minták mérésére szolgálnak az üreges (well-type) detektorok, ahol a minta a detektorkristály közepébe nyúló U-alakú üregbe kerül, ezáltal igen jó (majdnem  $4\pi$ ) térszögük van. Ilyen célra, még újabb fejlesztésként a "lóhere"-típusú (Glower-type) detektorok jelentek meg, ahol egy detektorfejben 4 különálló hengeres kristály van és a közöttük kialakuló üregbe kerül a minta. Itt a négy kristály elektronikai összehangolása a műszaki fejlesztés kritikus feladata.

Az adatgyűjtés általában sokcsatornás analizátorral történik. A manapság legelterjedtebb adatgyűjtő egységek egyben tartalmazzák a detektor működtetéséhez szükséges tápegységet, az erősítőt és a sokcsatornás analizátort, a számítógéphez pedig USB-n, illetve vezetékes hálózaton vagy wifi-n keresztül kapcsolódnak. Így akár helyi, akár távoli kezelésük lehetséges. Az adatgyűjtő egységek között vannak olyanok, amelyek beépített akkumulátorról is tudnak működni (akár 6–8 órán át), így a mérőrendszer függetleníthető az elektromos hálózattól, ami helyszíni mérések során előnyös. Még több információ rögzítését teszi lehetővé a lista módú adatgyűjtés, amikor az energia-gyakoriság hisztogram helyett minden egyes detektált gamma-fotonhoz az energia mellett az esemény idejét is tárolja az adatgyűjtő rendszer, amiből időfüggő folyamatok (pl. bomlásból eredő intenzitásváltozás a mérés alatt) is visszanyerhetők.

### *Árnyékolás*

Kis aktivitású környezeti minták mérésekor igen lényeges, hogy a természetes háttérsugárzás járuléka minél kisebb legyen a felvett spektrumban. A háttér passzív és aktív módszerekkel csökkenthető.

A passzív háttérsökkentés legegyszerűbb eszköze az árnyékolás. Egyszerűbb esetben ez ólomtorony, komolyabb árnyékolás esetén pedig vastag (15–20 cm) falú vaskamra, amely a kamra falában keletkező másodlagos sugárzás gyengítésére a belső oldalán néhány mm ólom, azon pedig mm körüli rézréteggel van burkolva. Mind az ólom-, mind a vas-árnyékolások esetén a minél régebbi anyagok használata előnyös, ha ilyen rendelkezésre áll. Ólom esetén a természetes bomlási sorban is jelenlevő  $^{210}\text{Pb}$  izotóp lebomlása a cél, amelynek 22 év a felezési ideje. Vas-árnyékolás esetén célszerűek a második világháború előttről származó, a nukleáris technikák világméretű elterjedése előtt gyártott vasanyagok használata, mert ezek még mentesek mindenfajta mesterséges radioizotóptól. Az üres – minta nélküli – mérőhelyen felvett spektrum a kamraháttér, amit a minták mérése során felvett spektrumokból le kell vonni. Két vaskamra háttérét látjuk az 2. ábrán, bennük megjelölve a háttérben megtalálható természetes bomlási sorok tagjait.



nagyobb dózisteljesítmények megbízható mérésére sok esetben egy GM-cső is van a készülékben, arra az esetre, ha a szcintillációs detektort tartalmazó mérőlánc a nagy intenzitástól telítésbe menne. Az ilyen készülékek kimondottan alkalmasak sugaras létesítmények sugárzási viszonyainak felmérésére, forró pontok keresésére, ahol a dózisteljesítmény-emelkedést okozó radionuklidot vagy egyéb sugárforrást is azonosítani lehet vele, de elveszett sugárforrások keresésére is igen jók. A készülékek biztosítják a felvett spektrumok számítógépbe való átvitelét, a memóriakártya kiolvasásával, kábelen vagy vezeték nélküli hálózaton. Így a spektrumok a szokásos gamma-spektrometriai programokkal is kiértékelhetők. Az újabb készülékek műholdas helymeghatározó modult is tartalmaznak, így az elmentett spektrumhoz vagy mért dózisteljesítményhez a hely koordinátája is hozzárendelődik, ami által útvonal monitoring is végezhető.

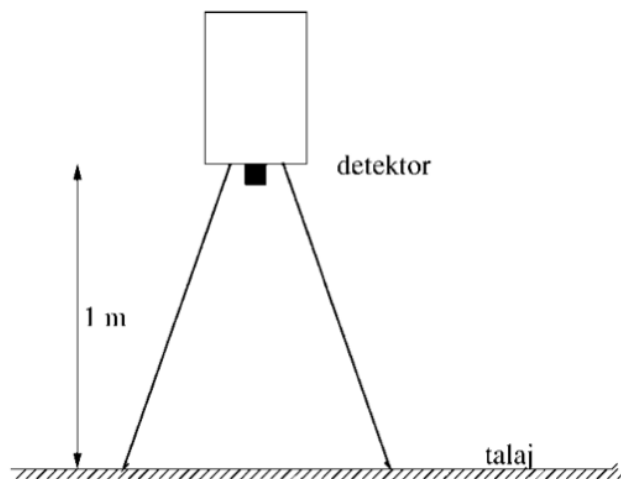
Néhány gyártónál HPGe detektorok is léteznek hordozható kivitelben, többnyire valamilyen elektromos hűtéssel, pl. Stirling-cikluson alapulóval. Ezek az eszközök a HPGe detektorok energiafelbontásával tudják a fentebb leírtakat, bár energiafelbontásuk általában nem éri el a laboratóriumi detektorok szintjét és többnyire háttérük is magasabb. A hűtés biztosítása miatt jellemzően nagyobb súlyúak, mint a szcintillációs detektorral szerelt készülékek, így a hordozhatóság ellenére nem igazán kézi műszerek.

### *Környezeti in-situ gamma-spektrometria*

A mindannyiunkat érő sugárterhelés egyik jelentős forrása a talajból és a talajfelszínről érkező közvetlen külső sugárterhelés. A talajból és annak felszínéről eredő sugárzásnak két forrása van. Az egyik a talajban található természetes radionuklidok, a  $^{238}\text{U}$  és a  $^{232}\text{Th}$  bomlási sorok elemei, valamint a  $^{40}\text{K}$ . A másik forrás a levegőből a talajra kihullott természetes és mesterséges radionuklidok. Ezek először a talaj felszínén terülnek el, de hosszabb idő alatt a talaj mélyebb rétegeibe is beszivárognak.

A talajból és annak felszínéről eredő sugárzás egyik hatékony mérési módszere az in-situ gamma-spektrometria. A módszert az 1960-as években H. L. Beck és munkatársai dolgozták ki [10]. A környezeti in-situ gamma-spektrometria során a talajfelszín fölé – jellemzően egy állványra – árnyékolatlan gamma-detektort helyezünk, és azzal mérjük a talajból érkező gamma-sugárzás energiaeloszlását, azaz a spektrumot. A gyakorlatban általában a talaj felett 1 m magasságban helyezük el a detektort (3. ábra).





3. ábra. Az in-situ gamma-spektrometriai mérések geometriája

### **Gamma-spektrometriás mérések értékelése**

A kiértékelésnél megkülönböztetnek minőségi (kvalitatív) és mennyiségi (kvantitatív) analízist. A radioanalitikában a minőségi analízis a mért mintát alkotó radionuklidok azonosítását, míg a mennyiségi analízis azok aktivitásának, illetve valamilyen közegben mérhető aktivitás-koncentrációjának megadását jelenti.

A nuklid-azonosítás alapja, hogy a radionuklidok gamma-sugárzásának energia-spektruma – azaz a kibocsátott fotonok gyakoriságának energia szerinti eloszlása – egyedi, az adott nuklidra jellemző. Így a kibocsátott sugárzás gamma-energiájának mérésével következtethetünk az azt kibocsátó nuklidra. Az egyes nuklidokra jellemző csúcsok táblázatokban és számítógépes adatbázisokban megtalálhatóak. A csúcsok azonosítása egyes esetekben igen bonyolult, mert különböző nuklidok is bocsátanak ki egymáshoz közeli energiájú gamma-sugárzást. Az esetek többségében a csupán energiaszelekció alapján szóba jöhető nuklidok közül a vonalgyakoriság és a felezési idő figyelembevételével kizárhatók azok, amelyek nagyon kis gyakoriságúak, vagy a felezési idejük miatt valószínűtlen a jelenlétük.

A gamma-spektrumokban a detektor környezetében található természetes radionuklidok vonalai, valamint a Compton-szóródásból származó folytonos spektrum is megjelenik. Az aktivitás kiszámítása előtt a mért minta spektrumában talált csúcsok intenzitásából a megfelelő vonalanknál a háttérrel le kell vonni.

A mennyiségi analízis során az egyes nuklidokra jellemző vonalintenzitásokból az aktivitás meghatározható. Ennek alapja az aktivitás és a vonalintenzitás közötti

$$I = A \cdot p_{\gamma} \cdot \varepsilon(E) \quad (1)$$

összefüggés, ahol

- $I$  a mért intenzitás (időegységre jutó nettó beütésszám), ami a nettó csúcs alatti területből határozható meg;
- $A$  a minta aktivitása;

- $p_\gamma$  a kérdéses vonal relatív vonalintenzitása, értéke gamma-spektrometriai táblázatokban megtalálható;
- $\varepsilon(E)$  a detektor hatásfoka az analízisre használt vonal E energiáján, az  $\varepsilon(E)$  függvényt a detektor hatásfok-kalibrációjával lehet meghatározni.

Az összefüggés átrendezésével a mért  $I$  intenzitásból az  $\varepsilon(E)$  hatásfok ismeretében az  $A$  aktivitás kiszámítható.

Mind a nuklidazonosítást, mind az aktivitás meghatározását a környezetellenőrzés rutin mérései esetén számítógépprogramok segítik. Ezek a programok elvégzik a csúcsok megkeresését, a csúcs alatti terület meghatározását, a háttérlevonást, a nuklidazonosítást és a hatásfok-kalibráció alapján kiszámítják az aktivitást.

Elterjedten használt gamma-spektrometria programcsomagok a Genie-2000 (Canberra), az InterWinner (ITECH instruments), a GammaVision (ORTEC), a FitzPeaks (Jim Fitzgerald, JF Computing Services), a SAMPO 90 (Lawrence Radiation Laboratory), InterSpec (Sandia National Laboratories) és a HyperLab (HyperLabs Software, Budapest, korábban Hypermet PC – MTA Izotópkutató Intézet).

A programok kezelésében számos hasonló elem található, mivel más-más koncepciót követve, de azonos feladatot valósítanak meg. A programok közötti választás inkább egyéni ízlés vagy megszokás dolga.

## FEJLESZTÉSEK A GAMMA-SPEKTROMETRIA TERÉN

A következő részben azokat a fejlesztéseket foglalom össze, amelyek a környezeti minták mérésének javítása, megbízhatóbbá tétele érdekében az Energiatudományi Kutatóközpontban történtek. A munkák egy része a Környezetvédelmi Szolgálaton történt, már része a Sugárbiztosági Laboratóriumban, mert a fejlesztések eredményét más mérések során is használtuk, illetve itt állt rendelkezésre a megfelelő eszköztár.

### *Gamma-detektorok hatásfokkalibrációja*

A mennyiségi gamma-spektroszkópiánál elengedhetetlen, hogy a detektorunknak a méréskor alkalmazott geometriára vonatkozóan kellően pontos hatásfokkalibrációja legyen. Ezalatt azt értjük, hogy a tekintetbe vett energia-intervallumban ismerjük detektor által regisztrált beütésszám és a minta által kibocsátott fotonok számának arányát, amit a detektor adott foton-energiára vonatkozó hatásfokának nevezünk. Ezt teljes-energiás csúcs-hatásfokként (full energy peak efficiency – FEPE) szokták nevezni, tekintettel arra, hogy a detektorba érkező gamma-fotonok egy része nem a fotocsúcsban (az úgynevezett teljesenergia csúcsban) jelenik meg, hanem a spektrum egyéb részeiben, mint a Compton-hátban, kiszökési csúcsokban vagy a visszaszórási csúcsban.

A hatásfokot alapvetően kétféle módszerrel lehet meghatározni: fizikai sztenderdekkel vagy számításos úton. A régebbi módszer a fizikai sztenderdekkel történő kalibráció, vagyis ismert radionuklidok ismert aktivitását tartalmazó minta spektrumát vesszük fel és az ismert aktivitás

és a gamma-vonalak detektált beütésszáma alapján határozzuk meg az adott gamma-energiára vonatkozó hatásfokot. Itt lényeges, hogy a kalibráló minta geometriai jellemzői megegyezzenek a tényleges méréseknél használttal (gyakorlatban azonos mintatartó, azonos geometria) valamint sűrűsége és átlagrendszáma minél inkább hasonló legyen azokhoz. A másik, újabb módszer a számításon, illetve szimuláción alapuló kalibráció: a minta és a detektor, illetve a körülöttük, közöttük levő anyagok jellemzőit (elemösszetétel, sűrűség, geometriai méretek) egy matematikai modellel leírják és a fotonok terjedését, kölcsönhatásait Monte Carlo módszerrel szimulálják, amiből meghatározható, hogy egységnyi aktivitású mintára milyen választ ad a detektor. Ehhez a detektor jellemzőinek pontos ismeretére van szükség, amit a detektor karakterizálásának hívnak és többnyire a detektor gyártójától megkapható, sajnos többnyire nem ingyen. Ha ez nem áll rendelkezésre, bizonyos jellemzők a detektor röntgenátvilágításával is meghatározhatók.

Akár a fizikai sztenderdekkel történő, akár a számításon alapuló kalibráció során amennyiben elegendően sok gamma-energiára tudunk így hatásfokot meghatározni, interpolációval a közbenső energiákhoz tartozó hatásfokra is tudunk következtetni, többnyire egy folytonos görbe energia-hatásfok grafikonra illesztésével. Megbízható hatásfok abban az energia-intervallumban kapható, amit a felhasznált gamma-energiák lefednek. Többnyire több radionuklid vonalai szükségesek a tekintetbe vett energia-intervallum lefedéséhez. Ezek lehetnek egy kalibráló sugárforrásba keverve (MIX-forrás) vagy egyenként.

2. táblázat. Gamma detektorok hatásfokkalibrációjára gyakran használt radionuklidok

nuklid	bomlási mód	felezési idő	legintenzívebb gamma vonalak
<sup>60</sup> Co	β-	5,29 év	1173,2 keV (100%) 1332,5 keV (100%)
<sup>133</sup> Ba	EC	10,551 év	356,0 keV (62%) 81,0 keV (34%) 302,9 keV (18%)
<sup>137</sup> Cs	β-	30,08 év	661,7 keV
<sup>152</sup> Eu	β-, EC	13,517 év	121,8 keV (28,6%) 344,3 keV (26,5%) 1408,0 keV (21,0%)
<sup>241</sup> Am	α	432,6 év	59,54 keV
<sup>57</sup> Co	EC	0,744 év	122,1 keV (85,6%) 14,4 keV (9,2%) 6,4 keV (49,2%) Fe-K <sub>α</sub>

Az 2. táblázatban felsorolt radionuklidok – az 1%-nál nagyobb relatív gyakoriságú vonalakat figyelembe véve – együttesen 26 energia – hatásfok pontot adnak a 53 keV és 1408 keV közötti

energia-intervallumban. Ezzel már elég jóelfogadható kalibrációt lehet csinálni a fenti energia-intervallumban, azonban sokszor ez több szempontból nem elegendő.

Az alábbi példákkal bemutatunk néhány olyan szempontot, amire a kalibráció során figyelemmel kell lenni.

Az egyik ilyen az egymással átfedő gamma-vonalak esete: a  $^{152}\text{Eu}$ -nek két gamma-emissziós vonalát sorolják fel a táblázatok 444,0 keV energiánál, 2,8%, illetve 0,3% relatív gyakorisággal. Ezek a spektrumban összeadódnak, így a hatásfok számításakor ezek összegével (3,1%) kell számolni.

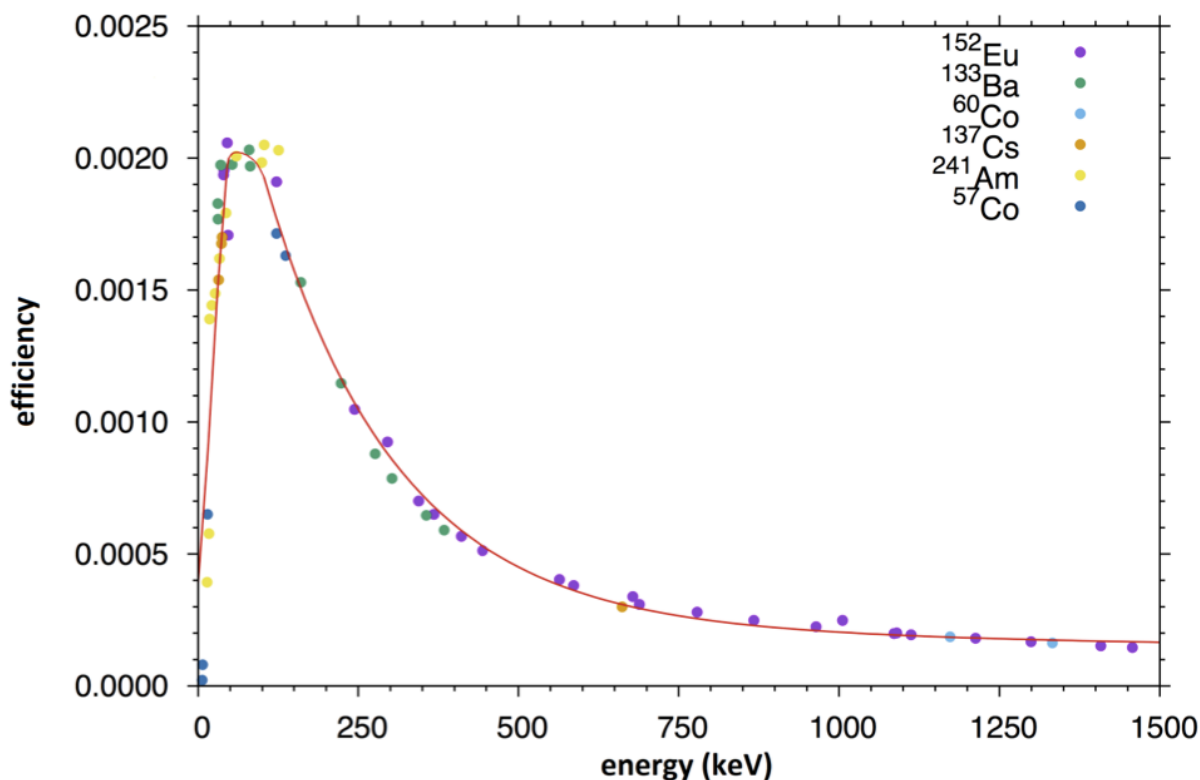
A másik figyelembe veendő szempont a háttérlevonás, ami a kalibráló spektrumok esetén is lényeges lehet. A  $^{133}\text{Ba}$  53,2 keV-es vonala (2,14%) átfed az  $^{234}\text{U}$  szintén 53,2 keV-es vonalával (0,125%), ami természetes radionuklid révén a környezetben is megtalálható.

### ***Hogyan vegyünk fel jó hatásfokgörbét***

Megbízható hatásfokgörbe felvételéhez annyi energia-hatásfok párra, azaz a kalibráló sugárforrásokból annyi gamma-vonalra van szükség, hogy az kellő sűrűséggel lefedje a tekintetbe vett energia-intervallumot. A hatásfokgörbe jellege miatt elsősorban ott érdemes a lehetőségek szerint sűríteni a pontokat, ahol a hatásfokgörbe gyorsan változik, azaz a kis energiákon (az energia csökkenésével a hatásfok meredeken csökken), a maximum közelében (a maximum pontos meghatározása érdekében) illetve a maximum feletti, gyorsan csökkenő szakaszon. Nagyobb energiákra, ahol már az exponenciális csökkenés jellemző, általában kevesebb pont is elegendő.

A gamma-detektorok hatásfokgörbéjére jellemző, hogy amíg a detektorral nem történik valamilyen változtatás, akkor változatlan mérési geometria esetén a hatásfok hosszabb idő alatt is változatlan marad. A közelmúltban hat év elteltével ellenőriztük egy detektor korábbi hatásfokkalibrációját, amit 1%-on belül a korábbival megegyezőnek találtunk. Mivel egy jó kalibráció időálló befektetés, érdemes időt szánni a mérésekre.

Az 1. táblázatban felsorolt radionuklidokkal végeztünk kalibrációt egy nuklidot tartalmazó pontforrásokkal, 30 cm távolságból. Olyan mérési időket alkalmaztunk, hogy az egyes radionuklidok 0,2%-nál nagyobb relatív gyakoriságú vonalaiban 1%-nál jobb mérési statisztika legyen, kb. 1,5 MeV energiáig, felette a 0,5%-nál nagyobb gyakoriságú vonalakra teljesült ez a feltétel. Ehhez nuklidonként 60 000 – 120 000 másodperc közötti mérési idők kellettek. Ezzel a módszerrel a hatásfokgörbe 61 pontját sikerült felvenni a 6,4 keV – 1457,6 keV energia-intervallumban (4. ábra). Mivel a különböző kalibráló forrásokból származó pontok sok helyen átfednek egymással, az azonos görbére illeszkedésük igazolja a műbizonylatban levő aktivitás helyességét, mivel ellenkező esetben az adott forrástól származó pontok kilógnának a görbéből. A hatásfokgörbe alacsony energiás részében (60 keV alatt) nemcsak gamma-, hanem karakterisztikus röntgenvonalakat is felhasználtunk a kalibrációhoz. Ennek részleteit a 4. ábra kapcsán mutatjuk be.



4. ábra. Széles energiatarományú (BEGe) gamma-detektor hatásfokgörbéje

#### A kalibráció kiterjesztése nagy energiákra

Az előző szakaszokban tárgyalt radionuklidokkal 1408 keV energiáig tudunk hatásfokkalibrációt felvenni. Így a környezeti mintákban mindig jelenlevő  $^{40}\text{K}$  1460,8 keV-es vonala már kívül esik ezen. Környezeti minták mérésekor úgy szoktuk beállítani a fő erősítőt, hogy a spektrum regisztrált részének vége körülbelül 2650 keV-nél legyen, biztosítva azt, hogy a  $^{208}\text{Tl}$  2614,5 keV-es vonala mérhető legyen, mivel a természetes radionuklidok vonatkozásában gyakorlatilag ez a legnagyobb energiájú mérhető gamma-foton. Nagyobb energiára szokták kalibrációra használni a  $^{88}\text{Y}$ -t, mivel két markáns gamma-vonala van 898 keV, illetve 1836 keV energiáknál. Rövid felezési ideje (106,6 nap) miatt viszont sokáig nem használható egy ilyen kalibráló sztenderd, emiatt a laboratórium gyakorlatában nem is alkalmazzuk. Helyette a kalibráció nagyobb energiákra való kiterjesztéséhez olyan természetes radionuklidokat keresünk, amely spektrumában megfelelő intenzitással előfordulnak a detektorunk meglevő kalibrációs energiasávjába eső, és annál magasabb energiájú gamma vonalak is. Ekkor a jelenlegi kalibrációnk által lefedett sávban levő vonalokból meghatározzuk a kiválasztott izotóp aktivitását, majd kiszámoljuk, hogy az egyes vonalak ismert gyakorisága alapján mekkora intenzitású a keresett nagyobb energiájú vonal. A mért intenzitásból így ki tudjuk számítani a hatásfokot ezekre az energiákra is.

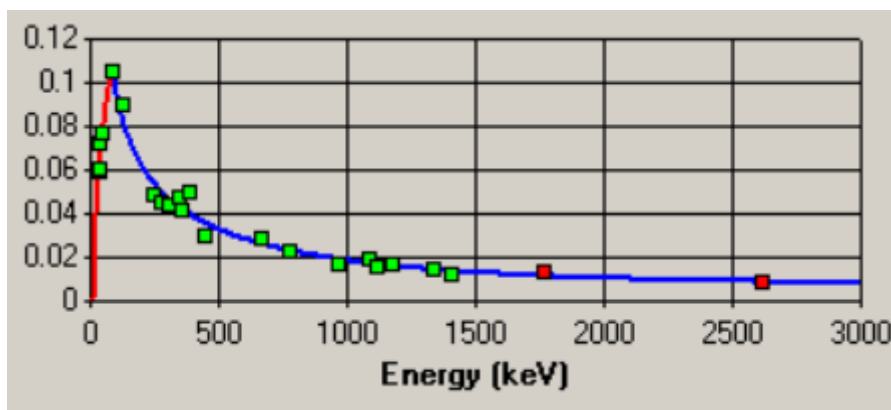
A természetes radionuklidok közül a  $^{208}\text{Tl}$  és a  $^{214}\text{Bi}$  látszik alkalmasnak a feladatra. Mindkettő természetes bomlási sor tagja. A gamma-vonalaik energiája a 3. táblázatban látható.

3. táblázat. A kalibráció nagyobb energiákra kiterjesztésére alkalma radionuklidok

$^{208}\text{Tl}$		$^{214}\text{Bi}$	
E (keV)	gyakoriság (%)	E (keV)	gyakoriság (%)
583,2 keV	22,6%	609,3 keV	46,1%
860,6 keV	12,4%	1120,3 keV	15,1%
2614,5 keV	99%	1764,5 keV	15,4%

Megjegyzés: a  $^{208}\text{Tl}$  510,8 keV-es vonalát (22,6%) az annihilációs csúccsal való átfedése miatt nem használjuk.

A leírt módon elvégzett hatásfokkalibráció eredménye az 5. ábrán látható, pirossal jelölve az újonnan nyert pontokat.



5. ábra. A hatásfokkalibráció kiterjesztése nagy energiákra, 2614,5 keV-ig

### A kalibráció kiterjesztése kis energiákra

A modern, vékony ablakos (többnyire karbon-epoxi) HPGe detektorok akár 5 keV energiától képesek detektálni a gamma- és röntgenvonalakat. Ebben a spektrumtartományban lényeges információ van, amit kár lenne megfelelő kalibráció hiányában nem felhasználni. Bizonyos radionuklidok csak ebben az energiatartományban mérhetők, pl. a  $^{125}\text{I}$ , amelynek egyetlen használható gamma vonala van (35,4 keV) illetve, mivel elektronbefogással bomlik, bomlásterméke, a tellúr karakterisztikus röntgenvonalait bocsátja ki magából (Te- $K_{\alpha}$ : 27,4 keV, Te- $K_{\beta}$ : 31,0 keV). A kis energiák alatt a 60 keV alatti energiatartomány értjük, lefelé addig az energiáig, amíg az adott detektor detektálni tud.

Az előbbi példából is látható, hogy ebben az energiatartományban, sőt már 100 keV alatt is jellemző, hogy keverednek a gamma- és röntgenvonalak. Ezeknek az eredete és keletkezése különböző: a gamma-fotonok az atommagban, míg a röntgenfotonok az elektronhéjban történő legerjesztődés során keletkeznek. Detektálás szempontjából azonban nincs különbség közöttük: elektromágneses sugárzás mindkettő.

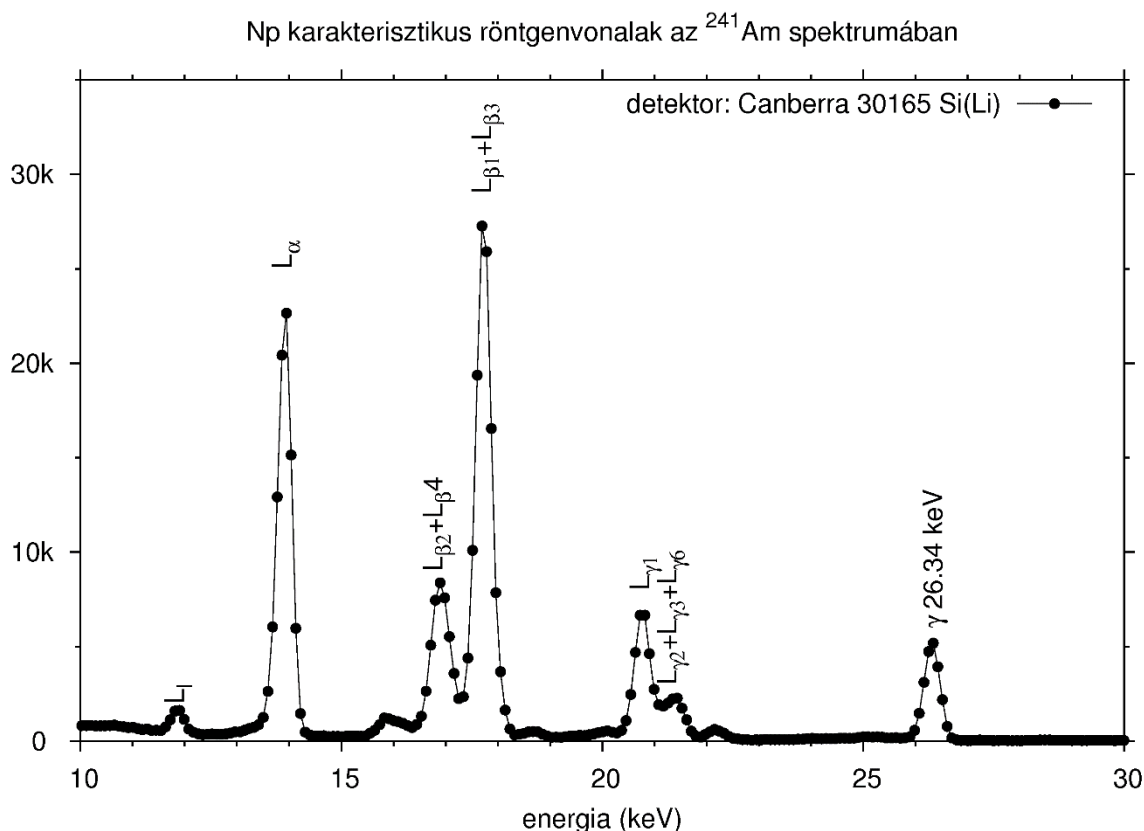
A kis energiás kalibráció céljára olyan radionuklidokat keresünk, amelynek használható vonalai vannak a tekintetebe vett energiatartományban. A széles energia-intervallumban sok intenzív gamma-vonalat kibocsátó, emiatt hatásfokkalibráció céljára előnyös  $^{152}\text{Eu}$  radionuklid részben  $\beta^-$  bomlással (27,9%), részben elektronbefogással (72,1%) bomlik. Utóbbi miatt – gamma-vonalak mellett – elektronbefogást követő bomlásterméke, a Sm karakterisztikus röntgenvonalait bocsátja ki. Ráadásul jelentős relatív gyakorisága miatt az említett röntgenvonalak a legintenzívebb vonalak a spektrumban. A kalibrációs célra szintén kedvelt  $^{133}\text{Ba}$  kizárólag elektronbefogással bomlik, így bomlásterméke, Cs karakterisztikus röntgenvonalait bocsátja ki. Az alfa-bomló  $^{241}\text{Am}$  szintén kibocsátja bomlásterméke, a neptúnium karakterisztikus röntgenvonalait. Ennek keletkezése azonban más, mint az előbbieket: itt a kibocsátott alfa-részecskék Coulomb-gerjesztéssel gerjesztik ki a leányelem karakterisztikus röntgenvonalait. A 4. táblázat felsorol néhány további radionuklidot, amelyeket kalibrációs célból fontolóra vettünk az alacsony energiás kalibráció céljából.

4. táblázat. Kisenergiás hatásfokkalibrációra használható nuklidok

nuklid	energia (keV)	gyakoriság (%)	megjegyzés	nuklid	energia (keV)	gyakoriság (%)	megjegyzés
$^{133}\text{Ba}$	30,85	99,51	Cs- $K_\alpha$	$^{57}\text{Co}$	14,41	9,16	
	35,14	22,08	Cs- $K_\beta$		122,06	85,60	
	53,16	2,20			136,47	10,68	
	79,61	2,62	$\Delta E=1,4\text{ keV}$	$^{109}\text{Cd}$	22,10	85,20	Ag- $K_\alpha$
	81,00	34,06			25,02	16,81	Ag- $K_\beta$
$^{152}\text{Eu}$	39,91	59,47	Sm- $K_\alpha$		88,04	3,61	
	45,66	14,40	Sm- $K_\beta$	$^{55}\text{Fe}$	5,90	25,40	Mn- $K_\alpha$
	121,78	22,58			6,49	2,99	Mn- $K_\beta$
$^{241}\text{Am}$	13,93	10,67	Np- $L_\alpha$	$^{125}\text{I}$	27,38	116,34	Te- $K_\alpha$
	17,46	11,90	Np- $L_\beta$		31,11	24,59	Te- $K_\beta$
	21,04	2,92	Np- $L_\gamma$		35,49	6,68	
	26,34	2,40		$^{154}\text{Eu}$	40,79	123,07	
	59,54	35,90			247,93	6,95	
$^{137}\text{Cs}$	661,67	85,1					
	32,06	5,54	Ba- $K_\alpha$				
	36,38	1,06	Ba- $K_\beta$				

A spektrumok illesztése során figyelemmel kell lenni arra, hogy a karakterisztikus röntgenvonalak alakja eltér a gamma-vonalaktól: jellemzően multiplettek, ahol a multiplett tagjainak távolsága a félvezető detektorok energiafelbontásánál kisebb (6. ábra). Emiatt a spektrumban megjelenő karakterisztikus röntgenvonalakat az általunk használt gamma-spektrumok értékelésére szolgáló programok nem tudják megfelelően kezelni. Egyrészt a

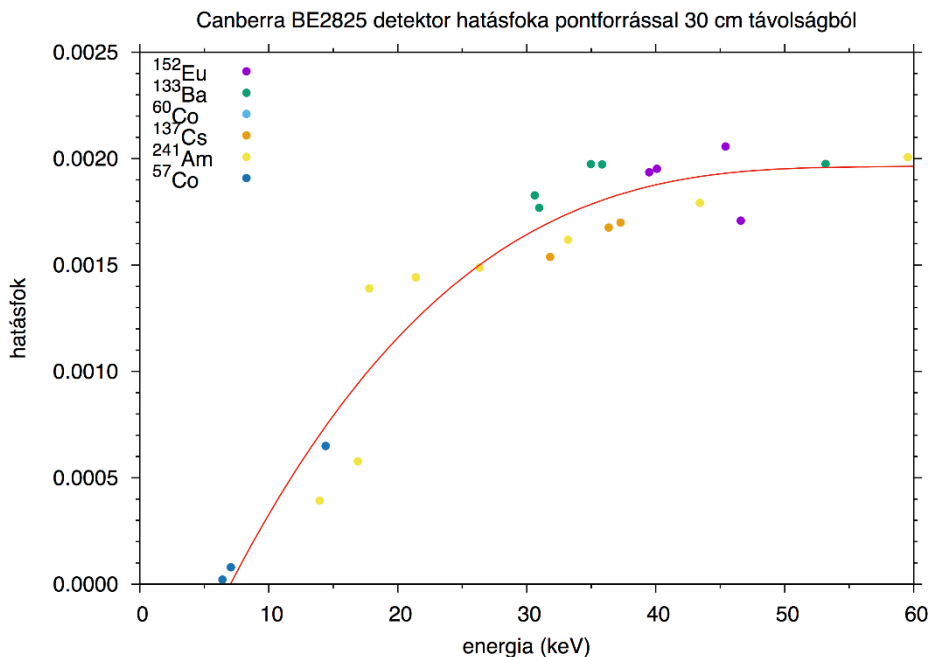
programok nuklid-könyvtáraiban a röntgenvonalak nincsenek benne, illetve a multiplett vonalak kezelésére sincsenek felkészítve. Ennek kiváltására a kérdéses vonalakra saját spektrumillesztő eljárást alkalmaztunk, illetve a QXAS (Quantitative X-ray Analysis System) röntgenspektrum-értékelő programot használtuk, amely alából tudja kezelni a röntgenvonalakat, a gamma-vonalakat pedig be lehet építeni a program által használt matematikai modellbe.



6. ábra. A röntgenvonalak multiplett szerkezete az  $^{241}\text{Am}$  példáján: Np röntgenvonalak

A leírt módszerrel mért hatásfokgörbe 60 keV alatti szakasza a 7. ábrán látható. Jól látszik, hogy a pontok szórása nagyobb, mint amit a nagyobb energiákon elértünk.

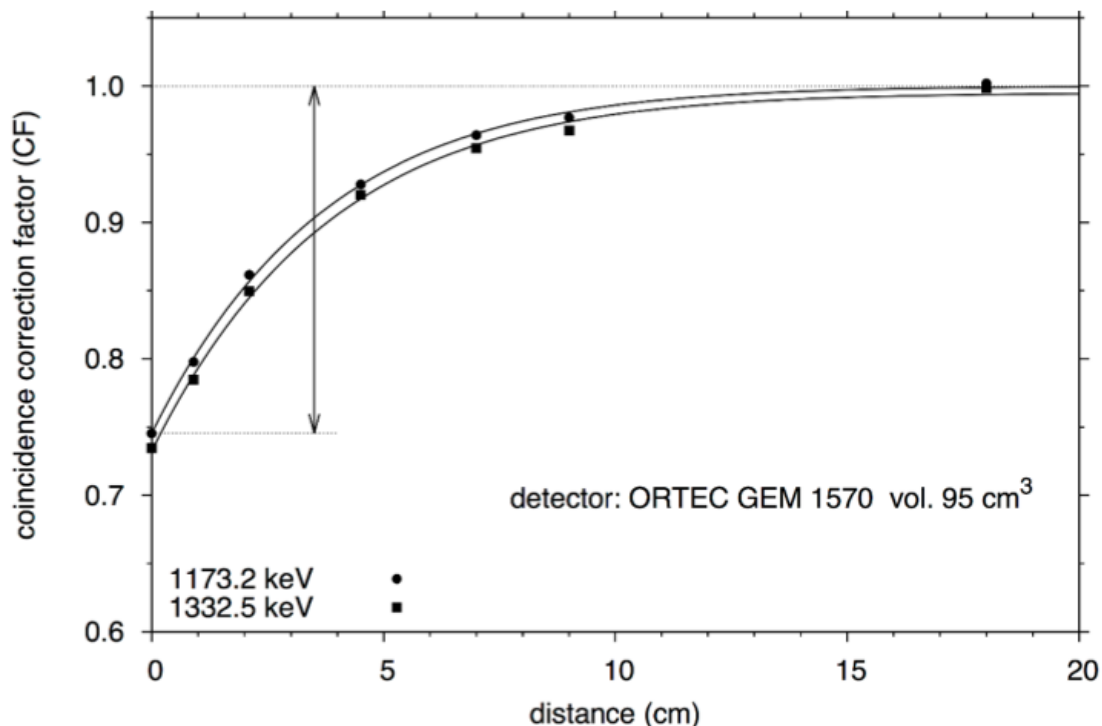




7. ábra. Mért hatásfokgörbe a 60 keV alatti energiatarományban

### Direkt mérési módszer a valódi gamma-gamma koincidencia-korrekciónak meghatározására

Kis aktivitású környezeti minták méréséhez a jobb kimutatási határ elérése érdekében minél kompaktabb mérési geometriát szokás alkalmazni. Többvonalas gamma-sugárzók esetén (pl.  $^{60}\text{Co}$ ) ennek következménye a valódi gamma-gamma koincidencia hatás megjelenése. Ekkor egyidejűleg több, egy bomlási folyamat során keletkezett foton érkezik a detektorba, amit az egyidejűség miatt a detektor egy eseménynek érzékel és az egyes fotonok energiái összeadódnak. A spektrumban egy összegcsúcs jelenik meg, az egyes fotonok által keltett eredeti csúcs intenzitása pedig kisebb lesz. Emiatt az aktivitás számításakor erre korrigálni kell. A szakirodalomban ennek meghatározására több módszer ismeretes, azonban többnyire több paramétert ismerni kell hozzá a mérőrendszer jellemzőiről, amit nem biztos, hogy ismerünk. Ennek kiváltására közvetlen mérési módszert dolgoztunk a valódi gamma-gamma koincidencia-korrekciónak meghatározására. A módszer azon alapul, hogy két radionuklidból álló mintát használunk: az egyik a mérendő nuklid, a másik pedig egyvonalas gamma-sugárzó, ami nem mutat koincidencia-hatást. A minta-detektor távolságot változtatjuk a mérés során alkalmazott helyzettől egyre távolítva a mintát addig, amíg a koincidencia-hatás elhanyagolhatóvá válik (az összegcsúcs nem jelentkezik). A távolság növekedéséből származó intenzitáscsökkenést az egyvonalas gamma-sugárzó határozzuk meg. A koincidencia-hatásból eredő intenzitáscsökkenés mértékét a többvonalas és az egyvonalas gamma-sugárzó tekintetbe vett vonalának intenzitásaránya adja meg (8. ábra). A módszerhez nem kell ismerni sem a detektor jellemzőit, sem a koincidencia-mérésre használt sugárforrások aktivitását.



8. ábra. Valódi gamma-gamma koincidencia-hatás mérése

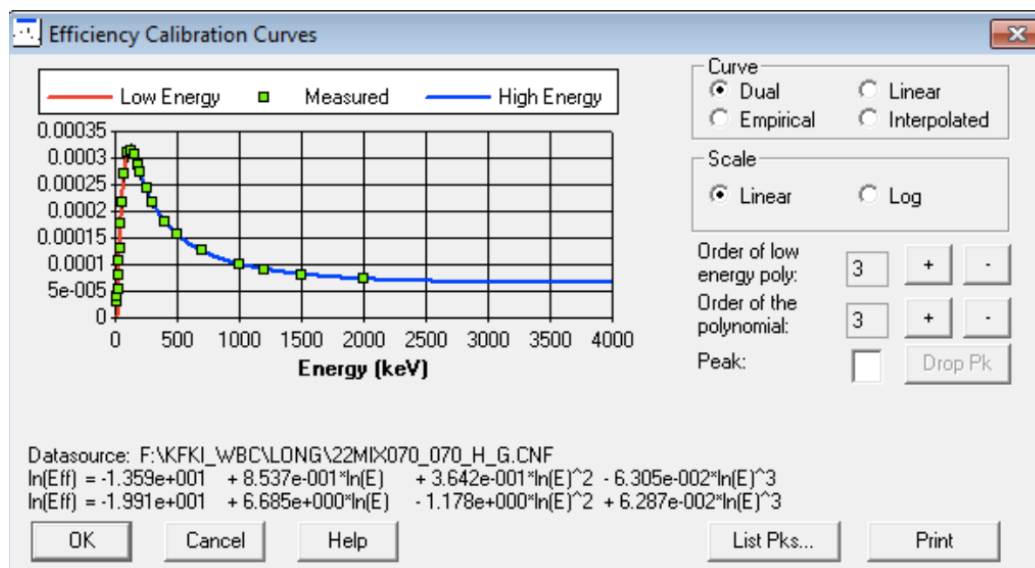
### *Az elterjedt gamma-spektrometriás programcsomagok előnyei és hátrányai*

Gamma-spektrumok felvételére, kezelésére és kiértékelésére számos elterjedt program áll rendelkezésre: Genie-2000, GammaVision, SAMPO, Hypermet, FitzPeaks, InterWinner, HyperLab, InterSpec stb. A kiértékelés különböző lépéseikhez olykor más-más program a legalkalmasabb. Rendszeresen végzett rutin mérések, sorozatmérések kiértékelésekor praktikus egy megegyezés szerinti program használata, az egységesség, az eljárás állandósága, összehasonlíthatósága miatt. Több program is lehetővé teszi adatgyűjtéstől a kiértékelésen át a riportkészítésig az egész folyamat automatizálását. Így a mérést és kiértékelést végző személynek az alapokon túl nem kell a gamma-spektrometria részleteivel tisztában lennie.

Érdemes felhívni a figyelmet a használt programcsomagok esetleges hibáira, illetve hiányosságaira is. Az automatizált kiértékelést érdemes ellenőrizni, mert időnként meglepő dolgokat produkálhat a program a csúcsok keresésekor és a csúcsterület meghatározáskor, illetve átlapoló csúcsok kezelésénél. Megtörténhet, hogy a program teljesen nyilvánvaló csúcsokat nem talál meg vagy félbevágott. Egyes nuklid-azonosító algoritmus átlapoló gamma-vonalak esetén hajlamos igen valószínűtlen nuklidokat feltételezni. Ezeket a tapasztalatainkat az évek során megosztottuk az érintett programok gyártóival, de sajnos nem sok javulást tapasztaltunk.

Bizonyos esetekben kerülő úton, vagy trükközéssel sikerült a programokat rávenni olyan funkciókra, amit a fejlesztők nem építettek be. Például a laborunkban és más intézményekben is elterjedten használt Genie-2000 program nem teszi lehetővé, hogy általunk bevitt hatásfüggvényt használjunk, csak azt, amit a program saját maga illeszt, amivel viszont nem

vagyunk maradéktalanul elégedettek. Itt kidolgoztunk egy olyan módszert, amivel – jelentős élömunka árán – megkerülhető ez a probléma: az általunk, egyéb módon meghatározott hatásfokgörbe elegendően sok pontját kézzel bevisszük a Genie-2000-be, akkor a program azokra ráilleszti az általa használt hatásfokfüggvény paramétereit, így gyakorlatban az általunk meghatározott hatásfokkal számol tovább (9. ábra).



9. ábra. Gamma-detektor hatásfokgörbéje gnuplot vagy GSanal illesztésből átvéve

### Az automatizált kiértékelés megbízhatóbbá tétele

A szokásos környezetellenőrző méréseknél jellemző, hogy a minták jelentős részében nincs semmi a háttéren felül, illetve a helyben termelt, feldolgozott mesterséges radionuklidok fordulnak elő kimutatható mennyiségben. Ugyanakkor időnként előfordulhatnak jelentősebb szintemelkedések, illetve új, ritkán tapasztalt radionuklidok megjelenése is a spektrumokban, amelyeket megbízhatóan detektálnunk kell. Az emberi erőforrások szűkössége miatt célszerű, hogy a spektrumértékelés minél kevesebb munkával történjen, ugyanakkor a megbízhatóság megmaradjon az automatizálással.

A spektrumkiértékelés megbízhatóságának javítására és a manuális munka-igény csökkentésére a kiértékelendő spektrumokat párhuzamosan több programmal értékeljük ki. Ha ezek a programok elfogadható eltéréssel azonos eredményt adnak, akkor feltehetőleg elfogadhatjuk az értékelésüket. Ha lényeges eltérés van a különböző programok által adott eredmények között, akkor meg kell nézni, hogy mi okozta a különböző eredményt. Eddig egyedi jellegű mérésekkor, illetve 2022-ben az egésztestszámláló kalibráló spektrumainak értékelésekor már alkalmaztuk ezt a több programmal végzett párhuzamos spektrumértékelést és az eredmények összehasonlítását. A környezetellenőrzés rutin méréseire való kiterjesztéshez programozásbeli fejlesztés szükséges, hogy a párhuzamos értékelések lefuttatását és a különböző formátumban keletkező eredmények összehasonlítását automatizáljuk.

### **Háttérsökkentési lehetőségek alacsony háttérű mérőhelyeken**

A gamma-spektrumokban megjelenő háttér az alábbi három fő összetevőből ered:

- a detektor környezetében megtalálható természetes radionuklidok,
- a detektor körüli térrészben található radon,
- a kozmikus sugárzás szóródása és a kozmikus sugárzás által keltett részecskék.

A kozmikus sugárzás csökkentésének egyik lehetséges módja a detektor föld alatti helységbe történő elhelyezése. A helyzetet bonyolítja azonban, hogy a föld alatt a körülvevő természetes radionuklidok árnyékolása lényegesebbé válik, illetve a radon is jobban összegyűlik föld alatti üregekben. A KFKI telephelyen az 1950-es években kozmikus sugárzással kapcsolatos mérések céljára épített, 30 méter mély Jánossy-aknában próbálkoztunk ezzel. Ide egy szokásos ólomtoronyot vittünk le és a gamma-mérések mellett folyamatosan monitoroztuk a radonszintet is, illetve a dózisteljesítmény mértük termolumineszcens dózismérővel (PorTL). Az aknában a 21-es épület vaskamrájához hasonló volt a dózisteljesítmény. A radonszintet azonban nem tudtuk a kívánt szintre csökkenteni, mert a szellőzőberendezés teljesítménye nem volt megfelelő. Azóta viszont új, lényegesen nagyobb teljesítményű szellőzőberendezés került az aknába, amivel a radonszint is kellően lecsökkenthető lesz.

### **ÖSSZEGRZÉS**

A gamma-spektrometria nemcsak a radiológiai és nukleáris létesítmények környezetellenőrzése során elterjedten használt radioanalitikai módszer, hanem sok más területen sikeresen alkalmazzák, ahol valamilyen módon gamma-sugárzás keletkezik és ez hordoz információt a vizsgált jelenségekről. Ilyen módon a gamma-spektrometriát igen széles körben alkalmazzák, ami miatt sok mérési tapasztalat gyűlik világszerte. A gyártók az igényekre válaszolva egyre újabb műszerekkel jelennek meg. Ezek beszerzése főleg pénz kérdése, de az újabb, egyre többet tudó, jobb hatásfokú, energiafelbontású és számlálási sebességű műszerek egyre több lehetőséget adnak, amiket hasznosítani lehet a környezetellenőrző mérések során is.

### **IRODALOMJEGYZÉK**

- [1] Kanyár Béla - Béres Csilla - Somlai János - Szabó S. András: Radioökológia és környezeti sugárvédelem, Veszprémi Egyetemi Kiadó, 2000.
- [2] Fehér István, Deme Sándor (szerk.): Sugárvédelem, ELTE Eötvös Kiadó, 2010.
- [3] Gilmore Gordon: Practical Gamma-ray spectrometry, Wiley, 2008-2011.
- [4] J. Klusoň: Environmental monitoring and in situ gamma spectrometry, Radiation Physics and Chemistry 61 (2001) 209-216.
- [5] Keszthelyi Lajos: Szcintillációs számlálók, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
- [6] J. Eberth, J. Simpson: From Ge(Li) detectors to gamma-ray tracking arrays –50 years of gamma spectroscopy with germanium detectors, Progress in Particle and Nuclear Physics 60 (2008) 283–337.

- [7] Kocsonya András, Bodor Károly: Helyszíni mérési tapasztalatok hordozható NaI szcintillációs detektorral, MNT Nukleáris Technikai Szimpózium – Budapest, 2013. december 5-6.
- [8] IAEA Safety Standards: Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection for protecting people and the environment, No. RS-G-1.8 Safety Guide
- [9] IAEA Safety Reports Series No. 64, Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring
- [10] H. L. Beck, W. I. Condon, W. M. Lowder: Spectrometric Techniques for Measuring Environmental Gamma Radiation, 1964.
- [11] Energiatudományi Kutatóközpont Környezetvédelmi Szolgálat éves jelentései: <https://www.ek.hun-ren.hu/kornyeztvedelmi-szolgalat-jelentesek/>