



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Nukleáris Technikai Intézet

MÉRÉSI ÚTMUTATÓ

**Környezetmérnök hallgatók Fizikai kémia és radiokémia című tárgyának
laboratóriumi méréseihez**

Radioaktív sugárzások abszorpciójának mérése gáztöltésű detektorral
Készítette: Klujber Gergely

Gamma-spektrometria HPGe detektorral
Készítette: Dr. Szalóki Imre, Radócz Gábor

A hallgatók egy laboratóriumi gyakorlat során mindkét mérést elvégzik!

Radioaktív sugárzások abszorpciójának mérése gáztöltésű detektorral

Bevezetés

A radioaktív sugárzások detektálására többféle eszköz és módszer áll rendelkezésre az adott sugárzás fajtájától (pl. részecske vagy elektromágneses) illetve a vizsgálat céljától (pl. spektrometria, intenzitás-mérés) függően. A jelen mérést egy gáztöltésű Geiger–Müller (GM) számláló használatával végezzük el, amely a nukleáris mérés technikában – egyszerű felépítésének és nagy megbízhatóságának köszönhetően – az egyik leggyakrabban használt detektor.

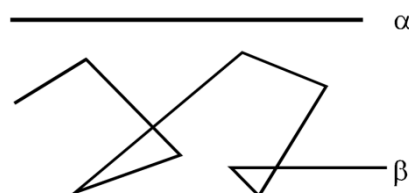
Elméleti összefoglalás

α - és β -sugárzás és anyaggal való kölcsönhatásuk

Az α -részecskék ${}^4\text{He}^{++}$ atommagok – két protonból és két neutronból állnak – és általában nagy atomtömegű ($A > 140$) magok bocsátják ki. A β -sugárzás részecskéje az atommagból származó elektron (*negatív β -bomlás* esetén) vagy pozitron (*pozitív β -bomlás* esetén), illetve ide soroljuk az *elektron befogást* (EC) is, amely során vagy egy Auger-elektron lökődik ki az atom egy külső héjáról, vagy ionizációra képes karakterisztikus röntgensugárzás kibocsátásával kerül az atom alapállapotba. A β -bomlást gyakran γ -sugárzás is kíséri, mivel az említett részecskék kibocsátása után gerjesztett állapotban maradhat az atommag.

A töltött részecskék anyaggal való kölcsönhatása abban nyilvánul meg, hogy a héjelektronok a közelükben elhaladó töltött részecskék hatására – a Coulomb-erők révén – impulzust vesznek fel („ütkeznek”). Ezen ütközések során az atom elektronjai gerjesztett állapotba kerülnek (*gerjesztés*) vagy akár ki is lökődhetnek (*ionizáció*). A kölcsönhatás egyik jellemzője az ún. *fajlagos energiaveszteség* – az egységnyi távolságra eső energiacsökkenés – amely (a pontos részletekre való tekintet nélkül) növekedik az abszorbens anyag atomsűrűségével, rendszámával és a részecske töltésével, illetve csökken a részecske sebességével (energiájával). (Részletekért lásd: [1], 17. és 26. oldalak). A kölcsönhatás tulajdonságai miatt ezekre a sugárzásokra jellemző, hogy energiájuktól és a közegtől függően jól meghatározott távolságot tesznek meg. Ez a **hatótávolság** (R), vagyis a távolság, ahol a sugárzás intenzitása gyakorlatilag nullára (elhanyagolható mértékűre) csökken.

Az **α -részecskék** mozgási iránya – tömegüknek és tipikusan nagy (3-9 MeV) energiájuknak köszönhetően – az ütközések során keveset változik, ezért **pályájuk gyakorlatilag egyenes**, nyomukban pedig viszonylag széles és rövid ionizációs csatorna alakul ki. A **β -részecskék** kis tömegük miatt **hosszabb, cikcakkos utat járnak be**, a hátrahagyott ionizációs csatornájuk gyérebb (1. ábra: Töltött részecskék ionizációs csatornája).



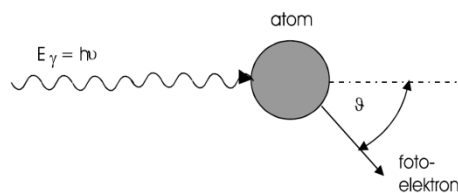
1. ábra: Töltött részecskék ionizációs csatornája

γ -sugárzás és anyaggal való kölcsönhatása

A γ -sugárzás elektromágneses sugárzás, az atommag energianívói közötti átmenet során kibocsátott foton-sugárzás (megkülönböztetésül: ha az elektromágneses sugárzás az elektronhéjból származik, *röntgen-* vagy *X-sugárzásnak* nevezzük). A γ - és X-sugárzások hasonló jellegűek, mint a rádió- és mikrohullámok, valamint a fény, a lényeges különbség közöttük az energiájukban és keletkezési módjukban van.

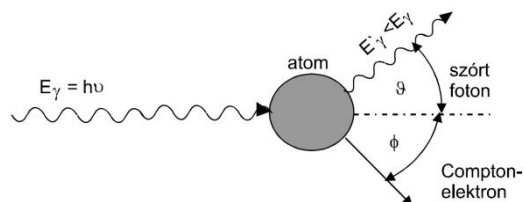
A γ -sugárzás anyaggal való kölcsönhatási formái lényegesen különböznek a töltött részecskék kölcsönhatási mechanizmusaitól, azonban közös jellemzőjük, hogy a reakciók során egy vagy több, jelentős energiával rendelkező elektron jelenik meg, amelyek – a β -sugárzáséhoz hasonló kölcsönhatások során – további ionizációhoz vezetnek. A reakcióknak három alapvető formája van:

- **fotoeffektus:** A foton abszorbeálódik (leadja a teljes energiáját), és kilök egy elektront az atomból.



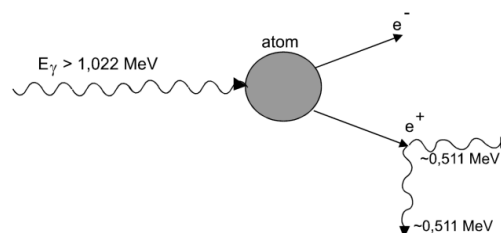
2. ábra: Fotoeffektus

- **Compton-szórás:** A foton kilök egy elektront az atomból, és egy kisebb energiájú foton is továbbhalad. A szórás során átadott energia függ a szóródás szögétől, és $\vartheta=180^\circ$ -os szóródási szög esetében a legnagyobb.



3. ábra: Compton-szórás

- **párkeltés:** A foton egy elektron-pozitron párt kelt az atommal való kölcsönhatás során az atommag erőterében. A reakció küszöbenergiája $E_\gamma \geq 1,022$ MeV, a fotonnak fedeznie kell az e^-e^+ pár nyugalmi tömegét. A többletenergia a keletkező részecskék mozgási energiájára fordítódik. A reakciót követően a pozitron egyesül egy elektronnal (*pozitron annihiláció*) és két, egyenként kb. 511 keV energiájú foton jelenik meg.



4. ábra: Párkeltés

Abszorpció

A sugárzás intenzitásának csökkenése jól közelíthető exponenciális függvénnyel:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu'x}$$

ahol I = számlálási sebesség az abszorbens után, I_0 = a számlálási sebesség az abszorbens nélkül, x = az abszorbens vastagsága (cm) és μ' = a **lineáris abszorpciós tényező** (1/cm). Az abszorpciós görbék fél-logaritmikus ábrázolásban közelítőleg lineárisak. A gyakorlatban, a különböző abszorbensanyagok könnyebb összehasonlíthatósága érdekében az alábbi formulát szokták használni:

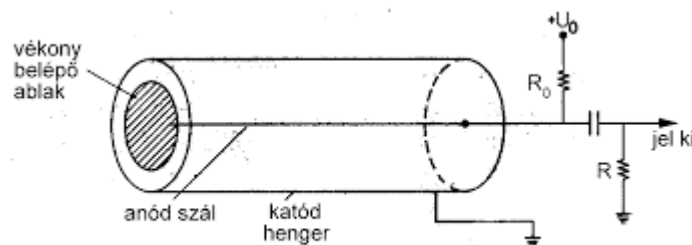
$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu'}{\rho} \rho x} = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

ahol ρ = az abszorbens sűrűsége (g/cm³), μ = a **tömegabszorpciós együttható** (cm²/g) és d = az ún. felületi sűrűség (g/cm²). μ a sugárzás energiájával van összefüggésben.

A fenti összefüggések csak jól kollimált és monoenergetikus átmenő sugárnyaláb esetén igazak. A gyakorlati mérés technikában a lecsökkent energiájú szórt sugárzást a sugárzás energiájától, az abszorbens anyagától és a mérés geometriájától is függő B („build-up”) faktorral szokták figyelembe venni: $I = B I_0 e^{-\mu d}$.

Geiger–Müller (GM) számláló

A gáztöltésű (vagy gázionizációs) detektorok alapvető működése a következő: a gázatomok ionizálódnak a sugárzás alkotta részecskék pályája mentén (a korábbi szakaszokban leírt kölcsönhatások szerint), majd ezeket a töltéseket elektromos tér segítségével összegyűjtjük, és a detektor kimenetén megjelenő elektromos jelet megmérjük.



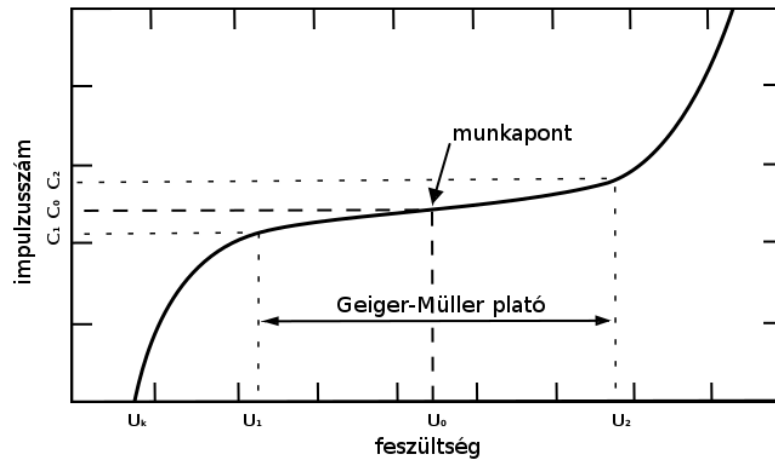
5. ábra: Gázionizációs detektor felépítése

A kamra elektródáira kapcsolt feszültség hatására az ionizáció során keletkezett elektronok a pozitív anód, a pozitív ionok pedig a negatív katód felé kezdenek gyorsulni a gázon keresztül. A keletkezett ionpárok mennyisége arányos a detektorban leadott energiával, azonban elegendően nagy elektromos tér hatására további ionizációt válthatnak ki (lokális töltésrobbanás alakul ki), így a sugárzás által keltett töltések többszöröse is elérheti az elektródákat. Ez a *gázerősítés*, nagysága függ az elektromos tér nagyságától.

Elég nagy feszültség esetén már az anódszál teljes hosszában kisülések alakulnak ki a gáztérben, ekkor a kimenő áram telítésbe kerül és már független az elsődleges ionpárok mennyiségétől. Ebben a tartományban működnek a Geiger–Müller-detektorok, és az említett jellemzőjük miatt nem alkalmasak sugárzás energiájának mérésére, kizárólag részecskedetektálásra.

A gázerősítés értéke ebben az esetben 10^6 - 10^7 nagyságú, a detektorból kimenő jel pedig további erősítés nélkül is elérheti az 1-5V értéket.

(Érdeemes megjegyezni, hogy túl nagy feszültség hatására már sugárzás nélkül is folyamatos kisülés alakul ki, amelynek következtében a detektor tönkremegy.)



6. ábra: GM-cső karakterisztikája, a plató U_1 és U_2 feszültség között helyezkedik el.

A 6. ábra: GM-cső karakterisztikája, a plató U_1 és U_2 feszültség között helyezkedik el egy GM-cső karakterisztikáját mutatja a Geiger-Müller plató környékén. A GM-csőves mérésekhez ismerni kell az adott eszközhöz tartozó *plató* paramétereit a *munkapont* megfelelő beállítása érdekében. A *plató hossza* és *meredeksége* jól jellemzik egy GM-cső jóságát (minőségét), a detektor „öregedésével” a plató szélessége csökken, meredeksége pedig nő.

A GM-csővek katódján a lavinákban keletkezett fotonok és az ionok további elektronokat válthatnak ki, fenntartva ezzel a kisülést. A kisülések kioltására két lehetőség áll rendelkezésre:

- **külső kioltás:** A detektorra kapcsolt feszültség külső elektronika segítségével lecsökkenthető addig, amíg az ionok elérik a katódot. Ilyenkor akkora a feszültségesés, hogy a gázerősítés elhanyagolhatóvá válik.
- **önkioltó GM-csővek:** A fő gázkomponenshez 5-10% mennyiségben többatomos szerves gőzt vagy halogén gázt adagolnak (*kioltógáz*), melynek feladata a pozitív ionok semlegesítése töltésátadással. A pozitív töltésű kioltógáz-ionok a katódon történő semlegesítése nem eredményez újabb lavinákat. A GM-csővekben a kioltógáz molekulái nem feltétlenül regenerálódnak (főként szerves kioltógáz esetén), ami korlátozza élettartamukat.

Mérés során használt eszközök

- Sr-90/Y-90 β - és Co-60 γ -forrás
- ST360 Radiation Counter (Spectrum Techniques) számláló berendezés
- N210/BNC (Saint-Gobain Crystals) típusú GM-cső, (üzemeltetési feszültség: 900 V)
- abszorbens készlet: plasztik, alumínium és ólom lapokkal



7. ábra: A mérésnél használt ST360 számláló, GM-cső és abszorbens készlet

Mérési feladatok

- 1.1 A GM-cső használatával mérje meg a β - és γ -forrásokból érkező sugárzás intenzitásának nagyságát különböző vastagságú (és tömegabszorpciós tényezőjű) abszorbens esetén.
- 1.2 Ábrázolja a különböző sugárforrásokhoz tartozó abszorpció görbéket és határozza meg (illesztéssel) a tömegabszorpciós tényezőket.
- 1.3 Határozza meg a β - és γ -források felezési rétegvastagságát (d_f = az az abszorbens rétegvastagság, amelynél az intenzitás a felére csökken) és a β -forrás hatótávolságát (R).
2. Végezzen el több (kb. 30-50) rövid (10-20s-os) mérést a β -forrás használatával, és határozza meg a GM-cső által regisztrált beütésszámok statisztikáját (szórását). Hasonlítsa össze a kapott értéket a Poisson-eloszlás feltételezése mellett számolt szórás értékével.

Ellenőrző kérdések

- Ismertesse a sugárzás és az anyag kölcsönhatásának formáit.
- Jellemezze a sugárzás intenzitásának gyengülését anyagban.
- Ismertesse a GM-cső működési elvét.

Felhasznált irodalom

- [1] Bódizs Dénes, Atommagsugárzások mérés technikái; Typotex, 2006
- [2] Gyurkócsa Csaba, Gázionizációs detektorok vizsgálata, Mérési útmutató; BME NTI, 1997

Gamma-spektrometria HPGe detektorral

1. Bevezetés

A gamma-spektrometria az atommagból valamilyen magfolyamat következtében (radioaktív bomlás, mesterséges vagy természetes magreakció) kilépő gamma sugárzás energiájának, intenzitásának, szögeloszlásának mérésével foglalkozik.

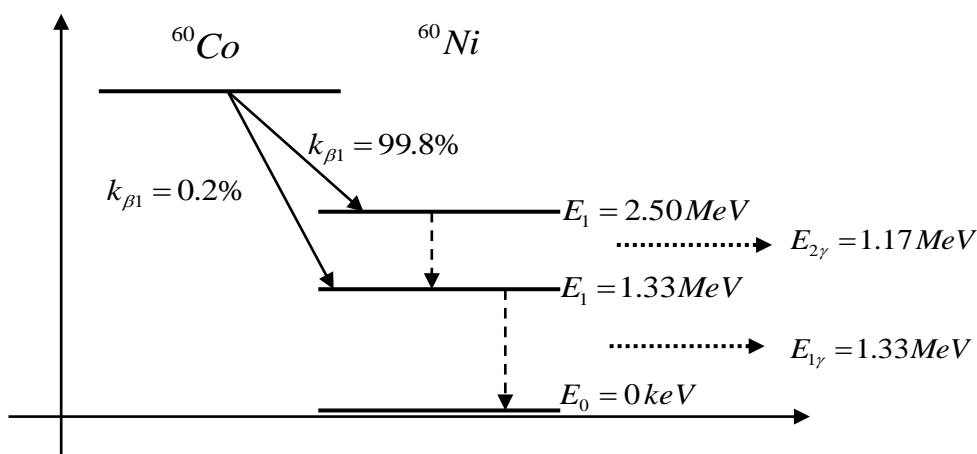
A gamma-spektrometriai gyakorlat során az alábbiakkal lehet megismerkedni:

- gamma-sugárzás és az anyag közötti kölcsönhatások megfigyelése
- gamma-spektrométer felépítése, az egyes részegységek spektroszkópiai jellemzői
- HPGe detektorok, jelfeldolgozó elektronika alkalmazása a gamma-spektrometriában
- gamma-spektrumok kvantitatív kiértékelése
- mérési adatok feldolgozása, azok bizonytalanságának becslése

2. Elméleti összefoglaló

Fotoeffektus, Compton-szórás, párkeltés, emisszió és abszorpció:

Az atommagok alfa- és béta-bomlásai, a maghasadás valamint a magreakciók gyakran a leánymag gerjesztett állapotához vezetnek. A magfolyamat során keletkezett atommag a gerjesztett állapotból általában egy vagy több gamma foton kibocsátásával tér vissza az alapállapotába. A radioaktív atommag bomlása során emittált gamma fotonok energiája, intenzitása vagy szögeloszlása információt hordoz a sugárzó atommag belső felépítéséről, szerkezetéről. Egy atommagnak több legerjesztődési folyamata is lehet, amit az ún. *bomlássémával* szoktak ábrázolni (1. ábra). Az 1. ábrán egy **A** tömegű és **Z** rendszámú atommag energianívóit a függőleges tengelyen, míg a vízszintes tengelyen a rendszámot ábráztuk.



1. ábra. ^{60}Co bomlási sémája

A különböző bomlási útvonalakhoz más-más átmeneti valószínűség tartozik, amit az adott β vagy γ emisszió gyakoriságának nevezünk. A gyakorisági értékek az adott atommagra jellemző olyan nukleáris állandók, amik azt adják meg, hogy ha az adott magból 100 db. elbomlik, akkor nagy valószínűséggel hány esetben emittál a mag adott energiájú β -részecskét vagy γ -fotont.

A gamma-sugárzás és az anyag kölcsönhatása három alapvető folyamattal jellemezhető: **fotoeffektus**, **Compton-szórás** és **párkeltés**.

A **fotoeffektus** során a gamma-foton átadja a **teljes energiáját** egy atom valamelyik kötött elektronjának, amely szabaddá válik, miközben az elektronburokban egy elektronhiányos állapot jön létre.

A **Compton-szórás** során a foton az energiájának (E_γ) csak egy részét adja át a szabad vagy az E_γ energiához képest kis kötési energiával rendelkező atomi elektronnak. A folyamat során a foton energiája és iránya megváltozik. A fenti szórási folyamatban a meglökött elektron energiája egy meghatározott energiatartományba esik a ϑ szög értékétől függően, aminek következménye a gamma spektrumokban megjelenő Compton-él és plató. Például a ^{60}Co bomlása során keletkező 1333 keV energiájú fotonhoz tartozó Compton-él energiája 1119 keV.

A **párkeltés** folyamata során egy gamma-foton a detektor anyaga egy atommagjának erőterében elektron-pozitron párrá alakulhat abban az esetben, ha a foton energiája nagyobb, mint a $2mc^2 = 1.022 \text{ MeV}$. A pozitron később egyesül egy elektronnal, aminek eredményeképpen **annihiláció** következik be. A folyamat során két 0.511 MeV energiájú foton jelenik meg a detektorban.

A fenti három alapvető kölcsönhatási folyamat eredménye a gamma sugárzás **abszorpciója**, aminek egy gamma nyaláb intenzitására gyakorolt hatását az (1) egyenlettel írhatjuk le, ahol μ az *abszorpció*s együttható, x az abszorbeáló anyag rétegvastagsága, I_0 a kezdeti, I az abszorbens réteg elhagyása utáni intenzitás.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

Mindhárom folyamat eredménye olyan elektronok megjelenése a detektor anyagában, amelyek elegendő energiával rendelkeznek, ahhoz hogy az elektromos vezetési folyamatban részt vegyenek. Összegyűjtve az így létrehozott töltéshordozókat a detektor elektromos kimenetén feszültség- vagy áramimpulzus jelenik meg, melynek amplitúdója arányos az abszorbeált gamma-foton energiájával. A spektrométer elektronikus és digitalizáló egységeinek feladata ezen impulzusok paramétereinek számszerűsítése és ez által a detektált gamma spektrum energia-eloszlásának megjelenítése.

3. A gamma-spektrometria eszközei:

Detektor

A nukleáris spektroszkópiában két fajta félvezető-detektor a legelterjedtebb: a Ge és a Si alapanyagú egykristályok. A Si detektorok elsősorban béta és nehéz töltött részecskék mérésére alkalmasak. Az egykristályos Ge anyagban kb. 3 eV abszorbeált energia szükséges egy elektron-lyuk pár létrehozásához. Ez az érték kb. tizede a gáztöltésű detektor és századrésze a szcintillációs detektorok hasonló értékeihez képest. Így, azonos energia átadásával a félvezető-detektorban lényegesen több töltéshordozó keletkezik, mint a másik két detektorban. Mivel a nagyobb számú töltéshordozó

számának relatív ingadozása lényegesen kisebb, ami a detektoranyagban abszorbeált foton-energia meghatározását sokkal pontosabbá teheti. Ez azt eredményezi, hogy a félvezető detektorokkal lényegesen jobb energiefelbontást lehet elérni, mint az egyéb detektortípusokkal. A kis sűrűségű, illetve relatíve kevés detektoranyagot tartalmazó gáztöltésű detektorok hatásfoka gamma-sugárzásra alacsony, míg a Ge nagyobb rendszáma és sűrűsége nagyobb detektálási hatásfokot eredményez, ami ideálissá teszi a gamma-sugárzás detektálására. A Si rendszáma kisebb, ezért elsősorban alacsony energiájú (3-60 keV) gamma- ill. Röntgen-sugárzás érzékelésére alkalmazzák.

A detektorra kapcsolt feszültség hatására létrejövő kb. 1000 V/cm-es elektromos térerősség a töltéshordozók egyirányú áramlását idézi elő a detektor elektródáira. Az így létrejövő töltésekből álló impulzust a detektorhoz kapcsolt áramkörök alakítják tovább.

Elektronikus jelfeldolgozó egységek

A gamma-spektrométerek egyes elektronikus egységeinek kiválasztását az adott nukleáris detektálási feladat szabja meg. Az **előerősítő** feladata a detektor és a főerősítő közötti illesztés, illetve a jel erősítése annak továbbítása előtt oly módon, hogy a jel/zaj arány minél kedvezőbb legyen. A **főerősítő**vel szemben támasztott követelmény a nagyfokú linearitás és időbeni stabilitás. A **sokcsatornás amplitúdó-analizátor** csatornánként szelektíven gyűjti az adott energiájú impulzusokat, fontos jellemzői: a gyorsaság, a linearitás és a csatornaszám. A **nagyfeszültségű tápegység** biztosítja a detektor működéséhez szükséges feszültséget (2 -5000 V). Félvezető-detektorok esetében nem kívánalom a nagy stabilitás, csak az alacsony elektronikus zaj. A **kisfeszültségű tápegység** (± 6 , ± 12 , ± 24 V) a különböző elektronikus egységek (erősítők, stb.) tápfeszültség forrása. A jelen gyakorlat során egy **DSP** jelfeldolgozó egységet használunk, amely elvégzi, a fentiekben felsorolt funkciókon kívül az analóg jelek digitalizálását és az egyes csatornatartalmakat közvetlenül a PC memóriájába tölti.

4. A gamma-spektrumok kiértékelése

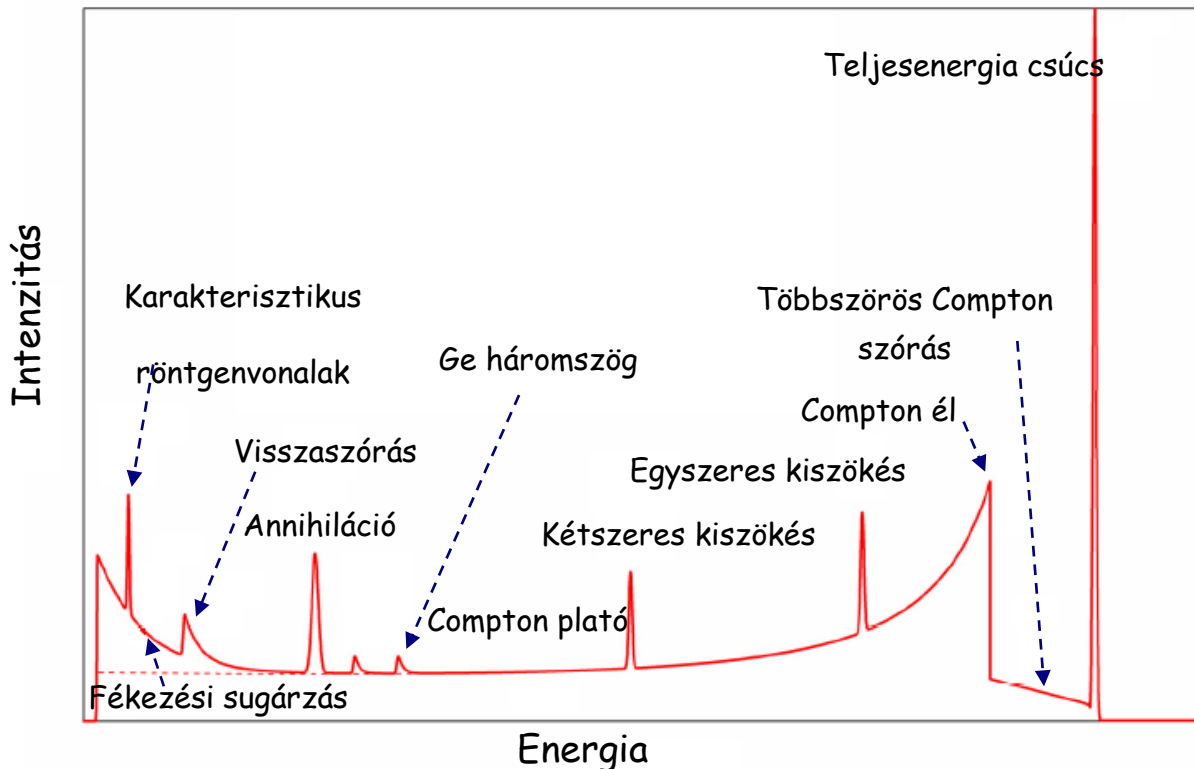
A 2. ábrán egy monoenergetikus gamma-sugárzásról felvett spektrum elvi alakja látható. A teljesenergia-csúcs megjelenése elsősorban a fotoeffektus révén következik be, ezért foto-csúcsnak is szokták nevezni. Az 511 keV energianál jelentkező ún. annihilációs csúcs vagy a párkeltési folyamat következménye, vagy egy pozitív bétabomló izotóptól származik. A visszaszórási csúcs a detektor burkolatán, a mérőhely árnyékolásának belső falán szóródott fotonok detektálásának következménye. A gamma spektrumokban a csúcsok alatt található folytonos háttér nagysága, és ezzel egy adott izotóp kimutathatósági határa csökkenthető a szóró felületek távolabb helyezésével és az anyaguk rendszámának csökkentésével. A visszaszórási-, annihilációs-, stb. csúcsok a Compton kölcsönhatás miatt kialakuló ún. Compton tartományra szuperponálódnak.

A spektrum kiértékelésének alapvető célja az, hogy a *teljesenergia-csúcsok* területét meghatározzuk. Ehhez a következő lépéseket kell tenni:

- a spektrum energia-kalibrációja
- csúcskeresés
- a csúcsokhoz tartozó izotópok azonosítása egy izotópkönyvtár alapján

- az átlapoló csúcsok matematikai szétválasztása és a spektrum matematikai függvényekkel történő illesztése
- csúcsterületek kiszámítása
- az egyes csúcsokhoz tartozó izotópok aktivitásának/fajlagos aktivitásának számítása.

A fenti feladatokat, a mérést vezérlő **Genie-2000** szoftverrel végezzük.



2. ábra. HPGe detektorral felvett gamma-spektrum szerkezete.

5. A gamma-spektrumok kiértékeléséhez szükséges fogalmak és a paraméterek számítása

A gamma-spektrométerek kvantitatív jellemzéséhez néhány alapvető paramétert kell definiálni. A detektor **energia-felbontóképessége** egy olyan, a gammafotonok energiájától függő paraméter, amely megadja egy adott energiájú gamma csúcs félértékszélességét (FWHM= full width at half maximum) a csúcs centrumához tartozó energia függvényében.

Definíció szerint:

$$f = \frac{\Delta E}{E_0} \cdot 100 \quad (2)$$

ahol f = az energia felbontás (%). Félvezető-detektorok esetében általában a ΔE ún. félértékszélességgel (FWHM = full width at half maximum) jellemzik a felbontást keV egységben megadva, az adott energián: E_0 = a teljesenergia-csúcs centroidja (keV).

A gamma csúcsokat matematikailag egy Gauss-függvénnyel lehet leírni a (3) egyenlet szerint. A görbe kiszélesedését jellemezni lehet a maximum érték feléhez tartozó csúcshélességgel (FWHM).

$$y_i = \frac{y_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(E - E_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

A csúcsok kiszélesedésének több oka is van, amelyek közül a jelentősebb járulékot adó tag a detektorban lejátszódó fizikai folyamatok, illetve a jelfeldolgozó elektronikus egységek által keltett zaj miatt következik be. Az f értéke egy adott detektor esetén függ a gamma-energiától (annak növekedésével javul) és valamelyest a számlálási sebességtől (ennek növekedésével romlik). Ge detektorok esetében a $\Delta E \approx 1.8 - 2.7$ keV közötti értékű 1333 keV (^{60}Co) gamma energiánál.

A félértékshélesség energiafüggését a Genie-2000 szoftver a (4) összefüggéssel közelíti

$$FWHM = a + b\sqrt{E} \quad (4)$$

ahol a és b konstansok és E a gamma-fotonok energiája.

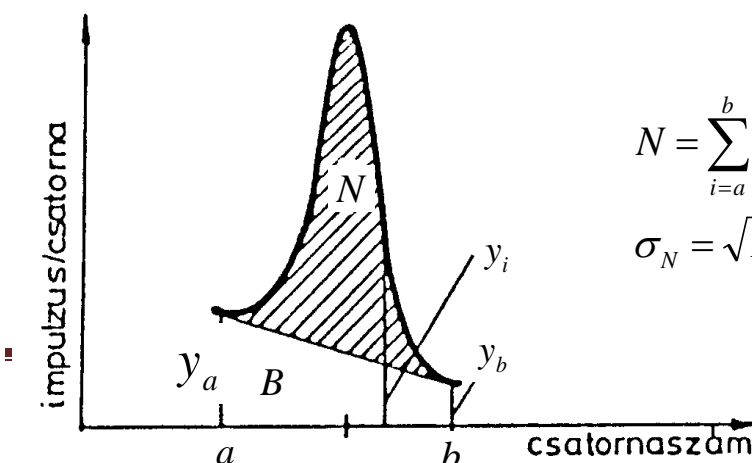
Az **abszolút vagy teljesenergia-csúcs hatásfok** értéke azt adja meg, hogy a sugárforrásból kibocsátott, adott energiájú összes gamma fotonból hányat regisztrál a detektor a teljesenergia-csúcsban. A hatásfok számszerű definícióját az (5) összefüggéssel lehet megadni, ahol N a teljesenergia-csúcs területe, amit egy, a mérés időpontjában az A aktivitású sugárforrás gamma-sugárzásának detektálásával kaptunk, t_m a mérés időtartama és k a gamma-gyakoriság értéke.

$$\eta = \frac{N}{t_m A_{ref} k} \quad (5)$$

Az **abszolút hatásfok** értéke csökken a gamma sugárzás energiájának növekedésével, növekszik a detektor térfogatával és jelentősen befolyásolják a mérési geometria paraméterei: forrás-detektor távolság, forrás alakja, kiterjedtsége és a forrás anyaga.

6. A csúcsterületek számítása:

A gyakorlat során a Genie-2000 kiértékelő szoftvert használjuk, ami a csúcsterület és annak hibája számítását automatikusan végzi a következő algoritmus szerint.



$$N = \sum_{i=a}^b y_i - (b - a + 1) \frac{y_a + y_b}{2}$$

$$\sigma_N = \sqrt{N + 2B}$$

A kiértékelő szoftverrel átlapoló csúcsokból álló együttesek is kiértékelhetőek. Ekkor a megfelelő spektrumrészletre több matematikai függvényből álló összetett alakot illesztünk, amely eredményéből a csúcsok alatti nettó terület meghatározható.

7. Mérési feladatok

7.1. Energia-kalibráció

Az energia-kalibráció elvégzéséhez helyezzen el a detektor elé ismert gamma-energiákat sugárzó, pontszerű, etalon sugárforrásokat. Vegyen fel egy gamma-spektrumot! A teljesenergia-csúcsok helyének megkeresésével, az energiák ismeretében határozza meg a gamma-energia-csatornaszám függvényt! Gyakorlatban a mért adatpárookra első- vagy másodfokú függvény illesztése szokásos. Ehhez a feladathoz használja a Genie-2000 szoftver energia-kalibrációra vonatkozó menüpontját (**Calibrate** menüpont). Legegyszerűbb esetben legyen két ismert kalibráló energia E_1 és E_2 , a hozzájuk tartozó csatornaszámok Cs_1 és Cs_2 . Feltételezve, hogy a berendezés lineáris, a szoftver az alábbi két ponton átmenő egyenes alapján számítja ki a kalibrációs egyenes meredekségét

$$m = \frac{E_2 - E_1}{Cs_2 - Cs_1} \left[\frac{keV}{csat} \right] \quad (6)$$

Ahol a m az energia-kalibráció egyenesének meredeksége, amely két csatorna közötti intervallum energia értékét adja meg az adott erősítés esetén. A (11) egyenletet célszerű átrendezni a következő formára, ahol b a kalibrációs egyenes tengelymetszete.

$$E = mCs + b \quad (7)$$

Az energia-kalibráció elvégzéséhez használja az **Calibrate/Energy Only Calibration** menüpontot, ahol a kalibrációhoz használt izotópok egyes vonalaira vonatkozóan be kell írni a vonal energiáját és a maximuma helyének csatornaszámát. A fenti művelethez használja fel a kalibráló gammaforrásokra vonatkozó, az 1. táblázatban található adatokat.

Mérje meg a gyakorlatvezetőtől kapott néhány etalon sugárforrás gammaspektrumát. Ellenőrizze a kiszámolt energia-kalibrációs görbét, a gyakorlatvezetőtől kapott források ismert energiájú vonalainak felhasználásával.

| 1. feladat: Energia-kalibráció meghatározása | | | | | |
|--|--------|---------------|--------------|-----|-----|
| | Izotóp | Energia (keV) | Csatornaszám | m | b |
| 1. | | | | | |
| 2. | | | | | |
| 3. | | | | | |
| 4. | | | | | |
| 5. | | | | | |

| | | | | | |
|----|--|--|--|--|--|
| 6. | | | | | |
| 7. | | | | | |

A feladattal kapcsolatos adatokat a részfeladathoz tartozó táblázatba jegyezze fel. A Genie-2000 által kiszámított paramétereket és az illesztett kalibrációs görbét a **Calibrate/Energy show** menüpont alatt találja.

7.2. A spektrométer energiafelbontásának meghatározása

Ehhez a feladathoz használja az előző pontban már felvett és tárolt spektrumot az ismert csúcsokkal. Határozza meg az egyes csúcsok FWHM értékét a Genie szoftver segítségével.

| 2. feladat: A spektrométer energia-felbontásának meghatározása | | | | | |
|--|--------|---------------|------------|----------|----------|
| | Izotóp | Energia (keV) | FWHM (keV) | <i>a</i> | <i>b</i> |
| 1. | | | | | |
| 2. | | | | | |
| 3. | | | | | |
| 4. | | | | | |
| 5. | | | | | |

7.3. A detektor abszolút hatásfok függvényének meghatározása

Vegye fel ismert aktivitású és energiájú etalon pontforrások gamma-spektrumát. A mért spektrumokat értékelje ki a Genie-2000 segítségével és számítsa ki a teljesenergia-csúcs integrálját (N), majd határozza meg a hatásfok értékeit (η) a mért csúcsok energiáinál az (5) összefüggés felhasználásával: $\eta = N/t_m A_{ref} k$.

| 3. feladat: A detektor abszolút hatásfoka energiafüggésének meghatározása | | | | | | | |
|---|-----------|----------------|-------|---------------------|---|--------------------|---------------------|
| A mintatartó magassági pozíciója: | | | | | | mm | |
| Izotóp | t_m (s) | A_{ref} (Bq) | Dátum | Gamma energia (keV) | k | $\eta_{számított}$ | $\eta_{illesztett}$ |
| 1. | | | | | | | |
| 2. | | | | | | | |
| 3. | | | | | | | |
| 4. | | | | | | | |
| 5. | | | | | | | |
| Az illesztett hatásfok paraméterek értékei | | | | | | | |
| a | | b | | c | | d | |

Ábrázolja a számított hatásfok értékeit ($\eta_{számított}$) az energia függvényében log-log formában! A mért hatásfokadatokra a (8) szerinti polinom függvényt célszerű illeszteni, ahol η az E energiánál a fenti táblázat szerint számított hatásfok értéke.

$$\ln \eta = a + b \ln E + c(\ln E)^2 + d(\ln E)^3 \quad (8)$$

Az illesztésből határozza meg az a, b, c, d , paramétereket. Határozza meg a detektor hatásfokfüggvényét az adott távolságra vonatkozó pontforrás geometriára.

7.4. Pontszerű radioaktív forrás aktivitásának meghatározása

Határozza meg egy, a gyakorlatvezető által megadott forrás aktivitását. Az aktivitás számítása az (5) összefüggésből származtatott (9) formula alapján történik, ahol N a nettó csúcsterület [imp], t_m a minta mérési időtartama, k az adott gamma-vonal gyakorisága.

$$A = \frac{N}{t_m \eta^k} [Bq] \quad (9)$$

Becsülje meg a kapott eredmény relatív hibáját (σ_A / A) a (10) összefüggés felhasználásával.

$$\frac{\sigma_A}{A} \approx \frac{\sigma_N}{N} = \pm \frac{(N + 2B)^{1/2}}{N} \quad (10)$$

| 4. feladat: Pontszerű radioaktív forrás aktivitásának meghatározása | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|--------|-----------------------------|-----|----------------------|-----------------|----------------------|
| A mintatartó magassági pozíciója: | | | | | mm | | | |
| Izotóp | t_m (s) | N (cps) | η | Gamma vonal energiája (keV) | k | $A_{számított}$ (Bq) | σ_A (Bq) | $A_{tényleges}$ (Bq) |
| 1. | | | | | | | | |
| 2. | | | | | | | | |
| 3. | | | | | | | | |
| 4. | | | | | | | | |

Irodalom

1. G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, John Wiley & Sonns, 2001.
2. Bódizs D., *Atommagugárzások mérés technikai*, Typotex Kiadó Budapest, 2006
3. Deme S., *Félvezető detektorok magugárzás mérésére*, Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1968
4. Nagy L. Gy., *Radiokémia és izotóptechnika*, Tankönyvkiadó Budapest, 1983
5. C.M. Lederer, J.M. Hollander, I. Perlman, *Table of Isotopes*, Wiley, New York, 1984
6. K. Debertin, R.G. Helmer, *Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors*, North Holland P.C. Amsterdam, 1988.

Kérdések

1. Ismertesse a gamma-sugárzás és az anyag atomjai között fellépő fontosabb kölcsönhatásokat és jellemzőiket!
2. Mi a jelentése a radioaktív izotópok bomlás sémájának?
3. Hogyan működik a gamma-sugárzás mérésére alkalmazott HPGe detektor?
4. Ismertesse egy gamma-spektrométer felépítését és az egyes egységeinek funkcióját, legfontosabb mérés technikai jellemzőit!
5. Milyen mérés technikai jelentősége van a gamma-sugárforrás geometriai alakjának a hatások és az önabszorpció szempontjából?
6. Miért szükséges a gamma-spektrométerek energia-kalibrációja és hogyan kell ezt elvégezni?
7. Mit jelent az energia-felbontóképesség a gamma-spektroszkópiában és hogyan változik egy HPGe detektor felbontóképessége az energia függvényében?
8. Mit jelent a spektrométer abszolút hatásfoka és hogyan lehet pontforrás esetén meghatározni?
9. Hogyan lehet figyelembe venni a háttérsugárzást a gamma spektrumok kiértékelése során?

| Kalibrálásra használt gamma etalon sugárforrások adatai | | | | | |
|---|-----------------------------|---------|--------|--------|--------|
| Izotóp | Gamma vonal energiája (keV) | | | | |
| | Gamma gyakorisága (%) | | | | |
| ²² Na | 1274.53 | | | | |
| | 99.95 | | | | |
| ⁵⁷ Co | 122.06 | 136.47 | | | |
| | 85.60 | 10.68 | | | |
| ⁶⁰ Co | 1332.50 | 1173.24 | | | |
| | 99.99 | 99.97 | | | |
| ¹³³ Ba | 356.02 | 81.00 | 302.85 | 383.85 | 276.40 |
| | 62.05 | 34.06 | 18.33 | 8.49 | 7.16 |
| ¹³⁷ Cs | 661.66 | | | | |
| | 85.1 | | | | |
| ²⁴¹ Am | 59.54 | 26.345 | | | |
| | 35.9 | 2.40 | | | |
| ¹⁵² Eu | 121.8 | 344.3 | 778.9 | 1408.0 | 1112.1 |
| | 28.6 | 26.5 | 12.9 | 21.0 | 13.6 |
| | 1085.9 | 964.1 | 867.4 | 778.9 | 244.7 |
| | 10.2 | 14.6 | 4.3 | 12.9 | 7.6 |
| | 411.1 | 443.9 | 919.3 | 1089.7 | 1212.9 |
| | 2.2 | 2.8 | 0.43 | 1.73 | 1.4 |
| | 1299.1 | 1457.6 | 1084.0 | 1005.3 | 488.7 |
| | 1.62 | 0.50 | 0.25 | 0.65 | 0.42 |