

Alkalmazott fizikai módszerek laboratórium

I.: Gamma spektroszkópia - Ellenőrző kérdések

Pál Balázs*

*Eötvös Loránd Tudományegyetem

2019. szeptember 18.

1. KÉRDÉSEK KIDOLGOZÁSA

1. Q: Milyen természetes radioaktív sorokat ismerünk?

A: α -bomlás során az adott mag tömegszáma 4-el csökken, β - és γ -bomlás során pedig nem változik. Emiatt 4 bomlási sort tudunk megkülönböztetni, melyeket egyértelműen a bennük található atomok tömegszámainak négyes maradéka különböztet meg egymástól. A Földön természetes körülmények között jelenleg is előforduló családok az ^{238}U , ^{235}U és ^{232}Th . Rövid felezési ideje miatt már csak mesterséges folyamatokból ismert a ^{237}Np család. A ^{232}Th család atomjainak tömegszámai 4-el osztva 0 maradékot adnak eredményül, a ^{235}U család esetében 1-et, a ^{238}U család tagjai 2-t, míg végül a ^{237}Np család tagjai 3-at.

2. Q: Hogyan, mi alapján határozzuk meg a gránit urántartalmát?

A: A labor során ezt az ún. „gamma-spektroszkópia” módszerével határozzuk meg. Látni fogjuk, hogy a gránitot tulajdonképpen csak az ^{238}U és annak leányelemeiből származó γ -bomlás során keletkező fotonok hagyják el, a benne található ^{232}Th -ből származó fotonok csak alig érzékelhetők. Ezek energiáját megmérve, karakterisztikus csúcsokat azonosíthatunk a kibocsájtott spektrumban, melyből következtethetünk a minta radioaktív összetételére. A megfelelő energiacsúcsok alatti terület arányos az aktivitással (és a mérési idővel), így a keresett radioaktív elem koncentrációjával.

3. Q: Hogyan működik, és milyen típusú az általunk használt detektor?

A: A mérésleírás alapján „a detektor egy nagy tisztaságú germánium félvezető detektor”. Ebben a mintából kisugárzó γ -fotonok teljes energiája leadódhat valamilyen fény-anyag kölcsönhatás (fotoeffektus, Compton-szórás, vagy párkeltést követő annihiláció) során. Ez minden esetben valamilyen töltött részecske (vagy részecskék) kiválását, vagy keletkezését okozza a fotont elnyelő anyagban. A nagy tisztaságú félvezetőből készült detektorunk esetében ez elektron-lyuk párok keletkezését fogja jelenteni, mely elektronok nagy intenzitású áramlását eredményezi így a detektorban, mely áramimpulzust arányos az elnyelődött foton energiájával és mely impulzust már meg tudunk mérni.

4. Q: Lehetne-e a fenti detektorral alfa- illetve béta-sugárzást mérni, és miért?

A: A detektor minden esetben a benne található félvezetőben keletkező elektron-lyuk párok keletkezését érzékeli. Minden olyan folyamat, melyek során ilyenek keletkeznek, azt a detektor képes érzékelni. Az α -bomlás során egy nagy tömegű, töltött α -részecske hagyja el a bomló magot, míg β -bomlás során egy e^- , vagy egy e^+ távozik. Ezek a töltésüknek köszönhetően, kölcsönhatva a félvezető töltött részecskéivel, fel tudják borítani a félvezetőben található egyensúlyi helyzetet, ezzel áramimpulzust létrehozva. Természetesen ezen részecskék szabad úthossza jóval rövidebb, mint a γ -bomlás során létrejövő fotoné, így detektálásuk minden esetre jóval nehezebb.

5. Q: Ha 1 kg talajban 0,01% uránt találunk, hogyan kell kiszámítani az urán aktivitását?

A: Az aktivitás képlete $A = \lambda N$, ahol N a részecskeszám, λ pedig a bomlási állandó. Ez esetben

$$A = \lambda_{^{238}\text{U}} \cdot \frac{m_{^{238}\text{U}}}{M_{^{238}\text{U}}} \cdot N_A = 6 \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}} \cdot \frac{1000 \cdot 0.001 \text{ g}}{238,03 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \approx 15180 \text{ Bq} \quad (1)$$

6. Q: Milyen adatok kellenek a mérésünkben az aktivitás kiszámításához? (képlet is)

A: A mérés során használt módszerben a γ -foton beütések energiaspektrumán található egyik karakterisztikus csúcs alatti nettó területet (N), a detektor ezen energiaintervallumra vonatkozó hatásfokát (η), valamint az ilyen energiájú γ -fotonok intenzitását (I) tudjuk megmérni.

Ezek mellett ismert érték a mérési idő (t), mellyel az aktivitás fordítottan arányos. Ezek alapján az aktivitást a következő képlet alapján határozhatjuk meg:

$$A = \frac{N}{\eta \cdot I \cdot t} \quad (2)$$

7. Q: Miért van szükség nagyfeszültségre a germánium detektor használatakor?

A: A mérési összeállításban használt 3000 - 4000 V-os feszítő-feszültség szerepe, hogy megakadályozza a γ -fotonok energialeadása során keletkező elektron-lyuk párok rekombinációját, rákényszerítve a félvezető elektronjait, hogy a pozitív-, a félvezető elektronhiányait pedig, hogy a negatív elektródákra gyűljenek össze és ezzel egy áramimpulzust hozzanak létre.

8. Q: Miért kell a detektort hűteni?

A: Ha nem hűtenénk folyamatosan a detektort, akkor nagy hőmérsékleten a félvezetőre kapcsolt feszítő-feszültség miatt már radioaktivitás nélkül is folyamatos áram folyna benne, így folyamatosan erős termikus zaj zavarná a mérésünket. Ezt elkerülendő, a detektor egy rézrúdra van helyezve, melynek egyik vége folyamatosan -196°C hőmérsékletű folyékony nitrogénbe van mártva.

9. Q: 0,119 g tiszta ^{238}U -nak mekkora az aktivitása, ha a bomlási állandója (kerekítve) $6 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$?

A: Az aktivitás képlete $A = \lambda N$, ahol N a részecskeszám, λ pedig a bomlási állandó. Ez esetben

$$A = \lambda_{^{238}\text{U}} \cdot \frac{m_{^{238}\text{U}}}{M_{^{238}\text{U}}} \cdot N_A = 6 \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}} \cdot \frac{0,119 \text{ g}}{238,03 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \approx 1806 \text{ Bq} \quad (3)$$

10. Q: Mi a szekuláris egyensúly, és mi a feltétele?

A: Ha egy bomlási sorban az anyaelem felezési ideje nagyságrendekkel hosszabb, mint a keletkező leányelemekéé, akkor a kettőjük aktivitása megegyezik, hisz értelemszerűen rövid időskálán pontosan annyi leánymag bomlik el, mint amennyi az anyaelem bomlása során keletkezett. Pontosán ezt az állapotot nevezzük *szekuláris egyensúlynak*, amikor egy bomlási sorban a keletkező leányelemek aktivitása megegyezik az anyaelem aktivitásával. Ilyenkor $A = \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_i N_i$.

11. Q: Hogyan működik az amplitúdó-analizátor, mi a feladata?

A: Az analizátor feladata, hogy a energiaspektrumot 8192 db egyenlő szélességű *bin*-re felossza és egy mérés során számlálja, hogy hány darab ε energiájú γ -foton nyelődik el a detektorban az adott *bin* által lefedett $\varepsilon \in [E, E + \delta E]$ energiatartományban. Végeredményül az elnyelődött fotonok energiájának eloszlását (hisztogramját) kapjuk meg.

12. Q: Hogyan kalibráljuk a mérési elrendezést (energiakalibráció)?

A: Egy ^{232}Th izotóp felhasználásával, melynek γ -emisszióját pár percen keresztül mérjük. Ezzel az ismert energiájú γ -fotonokat kibocsájtó anyag segítségével meghatározhatjuk, hogy az egyes karakterisztikus csúcsok pontosan mely *bin*-ekbe esnek az amplitúdó-analizátoron, így feltérképezve a mérőműszerünk skálázását. Ezután már könnyedén kiszámíthatjuk, hogy egy ismeretlen izotóp által létrehozott csúcsokhoz pontosan milyen energiák tartoznak, így azonosítva az ismeretlen anyagot.

13. Q: Lehetne-e a fenti detektorral béta-sugárzást mérni, és miért?

A: Erre ugyanaz a válasz, mint a 4)-es pontban.

14. Q: Hogyan hat kölcsön a detektorral a beérkező gamma-sugárzás, és hogyan függ ez az energiától?

A: Erre ugyanaz a válasz, mint a 3)-as pontban.

15. Q: Két csúcsot találunk a spektrumban, amelyek ugyanahhoz az izotóphoz tartoznak. Mindkettőre kiszámoljuk az aktivitást. Az egyikre $100 \pm 10 \text{ Bq}$, a másikra $112 \pm 5 \text{ Bq}$ az eredmény. Mennyi a két eredmény súlyozott átlaga, és annak hibája?

A: Az aktivitás súlyozott átlaga megadható az alábbi képlet segítségével:

$$\langle A \rangle = \frac{\sum_i \frac{A_i}{\sigma_i^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (4)$$

Ahol σ_i az adott A_i aktivitás abszolút hibája. Ebből a fenti értékeket behelyettesítve kapjuk meg a választ a kérdésben szereplő problémára:

$$\langle A \rangle = \left(\frac{100}{10^2} + \frac{112}{5^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{10^2} + \frac{1}{5^2} \right)^{-1} \text{ Bq} = 109,6 \text{ Bq} \quad (5)$$

Míg ennek *abszolút* hibája megkapható szabály szerint a következő képletből:

$$\sigma_{\langle A \rangle} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (6)$$

Melyet felhasználva megkapjuk a szükséges hibaértéket is:

$$\sigma_{\langle A \rangle} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{10^2} + \frac{1}{5^2}}} = 4,5 \text{ Bq} \quad (7)$$

Így az aktivitás végleges értéke:

$$\langle A \rangle = (109,6 \pm 4,5) \text{ Bq}$$

16. Q: A nettó csúcsterületre az eredményünk 200 ± 10 , a határfok pedig $0,02 \pm 10\%$. Az intenzitás az adott vonalra 0,5 és 20 másodpercig mértünk. Mekkora az izotóp aktivitása a mintában?

A: Már a 6)-os pontban ismertetett képlet alapján kiszámíthatjuk hibával együtt az aktivitást:

$$A = \frac{N}{\eta \cdot I \cdot t} = \frac{200 \pm 5\%}{(0,02 \pm 10\%) \cdot 0,5 \cdot 20 \text{ s}} = \left(\frac{200}{0,02 \cdot 0,5 \cdot 20} \pm \left(100 \cdot \sqrt{0,05^2 + 0,1^2} \right) \% \right) \frac{1}{\text{s}} = (1000 \pm 11,8\%) \text{ Bq} \quad (8)$$

17. Q: Mi az önárnyékolás és milyen nehézséget okoz a mérésnél?

A: Egy kiterjedt minta esetén annak a detektorhoz közeli részeiből jóval nagyobb intenzitással detektálhatunk γ -fotonokat, mint távolabbról. Ennek oka, hogy a távoli részek egyrészt jóval kisebb térszögben látják a detektort, másrészt hosszabb anyagtömegben kell áthatoljanak, hogy egyáltalán elérjék a detektort, abszorpció nélkül.

18. Q: Miért kell tudni a minta kémiai összetételét ahhoz, hogy meghatározhassuk az urántartalmát?

A: Az urántartalom pontos meghatározásához a számításainkat korrigálnunk kell a 17)-es pontban említett önabszorpció mértékével. Ahhoz, hogy ennek nagyságát megbecsülhessük, ismernünk kell az anyagban található elemekre vonatkozó kölcsönhatások pontos rendszám- és energiafüggését.

19. Q: A mintában a ^{214}Bi aktivitására $1000 \pm 55 \text{ Bq}$, míg a ^{226}Ra aktivitása $1500 \pm 75 \text{ Bq}$. Hogyan magyarázhatjuk a különbséget?

A: A bizmutter ellentétben a radon képes a közeteken átdiffundálni, így az utóbbi esetében nagyobb sugárzást mérhetünk ebből a faktorból fakadóan.

20. Q: Az egyik mintánkban csak az ^{235}U gamma-sugárzása észlelhető, a ^{214}Pb sugárzása nem. Mi lehet ennek az oka?

A: Az 1)-es pontban ismertetteknek megfelelően, a ^{214}Pb nem tartozhat a ^{235}U családjába, ugyanis tömegszámaik 4-es maradéka nem egyezik meg. Ha eredetileg csak a mért ^{235}U volt megtalálható az anyagban, akkor semmilyen módon nem kerülhetet oda ^{214}Pb , ugyanis a ^{235}U nem arra bomlik le. Mellesleg ismert, hogy a ^{214}Pb a ^{238}U család tagja.

21. Q: Milyen mesterséges és természetes izotópok mutathatók ki könnyen egy talajmintából gamma-spektroszkópiával?

A: A természetes forrásokból származóan a bomlási sorokból származóan az ^{238}U , ^{235}U és ^{232}Th detektálható, valamint az erősen β -bomló ^{40}K is könnyen azonosítható. A légköri atomrobbantásokból és a csernobili atomkatasztrófából származóan a ^{137}Cs izotóp is fellelhető a talajmintákban.