

Alkalmazott fizikai módszerek laboratórium

I.: Gamma spektroszkópia

Pál Balázs*
Somogyfoki Réka^{*,m}, Tuhári Richárd^{*,m}

2019. október 7.

Abstract

Az *Alkalmazott fizikai módszerek laboratórium* első alkalmával a gamma-spektroszkópia témakörét jártuk körül a labormunka során, melyen különböző radioaktív elemeket tartalmazó minták gamma-spektrumait vizsgáltuk. A labor ideje alatt megismerkedtünk a méréshez használt berendezéssel, egy germánium félvezető detektorral, és a hozzá tartozó eszközökkel. Felügyeltük a detektor előzetes beállítását és elvégeztük a rendszer energiakalibrációját, majd egyéni mérőfeladatokat hajtottunk végre a laborvezető utasításai alapján. Végezetül meghatároztuk ezek esetében a detektor hatásfokát is. Az egyéni feladat során egy ismeretlen, sárga színű, kristályos felületű anyag gamma-spektrumának vizsgálatát kellett elvégeznem.

I. BEVEZETÉS

A gamma-spektroszkópia módszere arra a megfigyelésre alapul, miszerint a γ -bomlásra képes anyagok karakterisztikus hullámhosszú, és így meghatározott energiájú fotonokat bocsájtanak ki magukból, mikor gerjesztett állapotból egy alacsonyabb állapotba kerülnek. Ezek a fotonok egy detektorban képesek leadni az energiájukat, amely energiát valamilyen módon detektálni tudunk.

A labormunka során egy nagy tisztaságú germánium félvezető detektor segítségével mértük ki különböző anyagok gamma-spektrumait, melyben az elhaladó nagyenergiás γ -fotonok - Compton-szórás, fotoeffektus, vagy párkeltés során - ionizálják a környezetüket, ezzel elektron-lyuk párokat keltve az anyagban. A detektorra kapcsolt feszítőfeszültség ezeket a kialakult párokat eltávolítja egymástól, megakadályozva azok gyors rekombinációját, előidézve egyúttal egy áramimpulzus létrejöttét a félvezetőben. Ez az impulzus detektálható és a foton által leadott energiával arányos. Sok hasonló foton energiájának megméréseével megkapjuk a minta pontos gamma-spektrumát, mely alapján a mintában található elemek beazonosítható válnak.

II. ENERGIAKALIBRÁCIÓ

A mérés során nem közvetlenül a detektorba csapódó fotonok energiáját, hanem az érzékeny, félvezető részében ionizáció hatására létrejövő áramimpulzusok nagyságát vagyunk képesek mérni. Ezeket az impulzusokat egy ún. „amplitúdó-analizátor” folyamatosan rögzíti. Az analizátor feladata, hogy egy adott áramerősség tartományt egyenlő szélességű *binekre* felosztson, majd számolja, hogy a mérés ideje alatt minden tetszőleges $[I, I + \delta I]$ *bin*-be hány darab áramimpulzus érkezik a detektorból. Ennek a jele egy számítógépre van kötve, melyen egy mérőszoftverrel valós időben

követhetjük ezen hisztogram fejlődését. Az adott minta aktivitásától függően, viszonylag rövid idő alatt már jól felismerhető válik a gamma-spektrum ismert alakja, a mintában található elemekre jellemző karakterisztikus foto-csúcsokkal együtt.

Az energiakalibráció során egy olyan ismert spektrumú anyagot helyezünk a detektorba, melynek karakterisztikus csúcsait könnyen azonosítani tudjuk és ismerjük a pontos energiájukat. Ezzel viszonylag pontosan meg tudjuk határozni az analizátorunk skálázását és annak *bin* – energia függvényét. Ezt követően már egy ismeretlen mintából származó csúcsokhoz tartozó energiákat is meg tudjuk mondani.

Esetünkben ezt a kalibrációt egy ^{232}Th tartalmú, Auer-gázégő izzóharisnya-jával végeztük el. A mérést $t = 30$ s hosszan végeztük, mely során $N = 3473$ áramimpulzust észleltünk. Az általunk használt analizátor névlegesen 4096 *bin*-re bontja fel a mért áramimpulzus-spektrumot, azonban a mi mérésünk során csak 4083 *bin* működött, feltehetően a műszer hibájából fakadóan. Néhány karakterisztikus csúcs azonosítása után a mérőszoftver segítségével elvégeztük a koordináta-tengely transzformációt, mely *bin* helyiértékekből keV mértékegységbe váltja át a skálánkat. Az alábbi összefüggést kaptuk az illesztés után:

$$E = 0,9255 \cdot \text{BIN} - 1,7343 \quad (1)$$

ahol $[E] = \text{keV}$, BIN pedig az adott *bin* helyiértéke 0 és 4083 között. Ezáltal az X-tengelyen az energiaskála $E = -1,7343$ keV és $E = 3777,0822$ keV értékek között húzódott. Méretarányosan megegyező, azonban ettől független egybeesés, hogy minden csúcs esetében, hasonlóan kb. 2–3 keV-el mértünk többet/kevesebbet, mint a valós értékek.

*Eötvös Loránd Tudományegyetem

^mMérőtársak

III. A HATÁSFOK MÉRÉSE

A detektorba érkező fotonok nem 100%-os valószínűséggel adják le az energiájukat, hanem vannak esetek, amikor a foton egyszerűen kölcsönhatás nélkül áthalad azon. Az összes mért és összes detektor felé kibocsájtódott foton arányát hívjuk a detektor hatásfokának, melyet η -val jelölünk. Ennek értéke az egyes energiatartományok más és más lehet, így minden foto-csúcsra egy individuális értéket fogunk kapni az η -ra eredményül.

Ennek kiértékelését egy külön szoftverrel végeztük, mely a foto-csúcsok centroidjainak pontos energiájából, valamint a használt minta anyagi- és geometriai tulajdonságaiból számította ki számunkra az egyes foto-csúcsokhoz tartozó energiaértékeken mérhető hatásfokot. Ezeknek értékeit a 3. táblázatban közlöm.

IV. EGYÉNI FELADAT KIÉRTÉKELÉSE

IV.1. A MINTA SPEKTRUMÁBAN TALÁLHATÓ CSÚCSOK AZONOSÍTÁSA

Az egyénileg történő mérés során egy kb. 1 cm átmérőjű, sárga színű, kristályos külsejű kődarabot kellett megvizsgálnom. Az anyag gamma-spektrumát $t = 1073$ s hosszú mérés során vettem fel, mely során $N = 264077$ áramimpulzust észleltem. A teljes lement spektrumot a 1. ábrán illusztráltam, míg a 2. és 3. ábrán ugyanezen spektrum egyes, kinagyított részeit jelenítettem meg a részletgazdagság reményében.

A mérőprogrammal 6 foto-csúcsot vizsgáltam meg, melyeknek felvettem a csúcsterületüket, és azok hibáját, valamint meghatároztam a csúcs pontos, mért helyét. Olyan csúcsokat választottam ki, melyek valamelyik ismert, természetes bomlási családból származhatnak, és melyeket - egy kivételével - könnyen azonosítani is tudtam. Ezen csúcsok pontos képét a 4. - 9. ábrákon vizualizáltam.

A 6 lement csúcsához tartozó pontos adatokat mind sikerült egyértelműen, γ -energiákat tartalmazó standardizált táblázatokból leolvasnom (Firestone és tsai., 1997 és S.Y.F. Chu és Firestone, 1999). Ezek adatait energia szerinti növekvő sorrendben az 1. táblázatban gyűjtöttem össze. Egyetlen gondot a 764, 24 keV-es csúcs jelentett, melynek mibenlétére a labormunka során felállított hipotézisek mind egyikét cáfolnom kellett. Később a laborvezető tanácsai alapján és a fent említett táblázatok segítségével ezt a $^{234}\text{Pa}^m$ izotóp, 766, 708 keV-os csúcsaként sikerült azonosítanom. Első megoldásként feltételeztem, hogy ez egy olyan elem csúcsa lehet, melynek nincs utánpótlása. Ez csak akkor lehetséges, ha a felezési ideje éves nagyságrendben mérhető, ugyanis a minta már évek óta a laborban állt. Ennél rövidebb felezési idejű elem esetén az már teljesen elbomlott volna, így nem is észlelhettünk volna belőle származó γ -fotonokat. A felezési idő aló határát végül 50 napnál húztam meg, ennél rövidebb $T_{1/2}$ -el rendelkező elemeket figyelmen kívül hagytam a továbbiakban. A 2. táblázatban azokat a magokat gyűjtöttem össze, melyek 50 napnál nagyobb felezési idővel rendelkeznek és 760 keV, valamint 766 keV között bocsájtanak ki γ -fotonokat. A

lehetségesen szóba jövő magok közül azonban mind egyik esetén sok másik csúcsnak is meg kellett volna jelennie a spektrumban, ennél jelentősen nagyobb intenzitásokkal, melyek közül azonban egy sem volt megtalálható.

Végül a laborvezető tanácsára elvetettem az ötletet, hogy ez egy utánpótlás nélküli mag, és átnéztem a $^{234}\text{Pa}^m$ gamma-bomlásából származó lehetséges foton-energiákat. Végül az említett táblázatokban megtaláltam, hogy ez feltehetően a $\gamma_{4,1}$ tranziensből származó fotonhoz tartozó csúcs lehetett, melynek intenzitása relatíve jelentősen nagy ($I = 0,3290\%$) és 766, 708 keV-os energiája közel megegyezik a mért értékekkel.

IV.2. AZ AKTIVITÁS KISZÁMÍTÁSA

A mintában található radioaktív elemek A aktivitását az alábbi képlet segítségével határozhatjuk meg:

$$A = \frac{S}{t \cdot I(E, n) \cdot \eta(E, n)} \quad (2)$$

ahol S az adott foto-csúcs alatti nettó terület, t a mérés időtartama, $I(E, n)$ az adott energiájú γ -fotonok intenzitása, az úgynevezett „elágazási arány”, míg végül $\eta(E, n)$ a detektálási hatásfok (Ebaid, 2010).

Ezen adatok mindegyike ismert és az (1). és (3). táblázatból kiolvasható. Az egyes csúcsokhoz tartozó aktivitásértékek hibái a standard hibaterjedés szabályai alapján az alábbi képlet segítségével számíthatóak ki:

$$\delta A = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta}{\eta}\right)^2} \quad (3)$$

A számításokban az I intenzitás és a t időmérés hibáját 0-nak vettem. A kapott értékeket a 4. táblázatban közöltem. Ezen adatok felhasználásával már megkapható a mintában található ^{235}U mennyisége, mely a táblázatokban ugyanígy van jelölve, valamint az ^{238}U mennyisége is, mely a táblázatban is jelölt leányelemvel, a $^{234}\text{Pa}^m$ maggal szekuláris egyensúlyban tartózkodik, tehát aktivitásuk megegyezik. Az aktivitás megadható a következő összefüggésből is:

$$A = \lambda N \quad (4)$$

ahol $\lambda = \ln(2) / T_{1/2}$ a bomlási állandó, N pedig a részecskeszám. Az utóbbi az A és λ ismeretében már megadható, mely értékeket szintén a 4. táblázatban közöltem. A részecskeszámok vizsgálatával kiszámíthatjuk az ^{235}U és ^{238}U arányát a mintában. Természetes körülmények között az ^{235}U részecskék aránya 0,72%, míg a maradék tulajdonképpen csak ^{238}U . Az ^{235}U és ^{238}U -hoz tartozó kapott részecskeszámokat átlagoltam, végül ezek arányából számoltam a két izotóp arányát. A számolás menete az A. függelékben található. Végeredményként a két izotóp arányára az alábbi jött ki:

$$\frac{N_{^{235}\text{U}}}{N_{^{238}\text{U}}} = (0,45 \pm 0,03) \% \quad (5)$$

Mely eredmény a természetesnél valamivel ritkább urántartalmú, de mindenképp a természetesen várhatóval nagyságrendileg megegyező telítettségű mintát indikál.

A teljes (súlyozott) aktivitás és annak hibájának kiszámításához használhatjuk a mérésleírásban is megtalálható képleteket, melyeket külön itt nem közlök. Az aktivitás részletes számítása ezek alapján az A. függelékben található. A végleges érték a következő:

$$\langle A \rangle = (238,34 \pm 3,84) \text{ Bq} \quad (6)$$

V. ÁLTALÁNOS SZÁMÍTÁSI FELADATOK

V.1. HÁTTÉRSUGÁRZÁS

A detektorba normális esetben rengeteg, légköri radonból származó γ -foton csapódna. Ezen hatást elkerülendő, a detektor vastag ólomtéglákból rakott „házikóval” van körbevéve, így kiszűrve a levegőből és a falakból érkező sugárzás jelentős részét. Ahhoz, hogy az ólomburok fontosságát megérthes-

sük, két mérést végeztünk el. Az első alkalommal a burkot teljesen bezárva, behelyezett minta nélkül mértük meg a háttérsugárzás mértékét, majd második alkalommal ugyanúgy minta nélkül, azonban a burok „ajtáját” kinyitva, rajta egy téglányi rést hagyva indítottunk el egy hasonló mérést.

A két mérést összehasonlítandó értékeket a 5. táblázatban közlöm, mely tartalmazza az aktivitásokat és azok $1/\sqrt{N}$ -es relatív hibáját is. Feladatunk volt kiszámítani, hogy teljesen burok nélkül, gömbszimmetrikus geometriát és lineáris függést feltételezve, mekkora lenne az észlelt γ -fotonok aktivitása? Ezeket figyelembe véve azt mondhatjuk, hogy 1 téglakivétele a burokból $2,75 \text{ Bq} - 1,07 \text{ Bq} = 1,68 \text{ Bq}$ -val növeli az aktivitást az 1,07 Bq-es zárt állapot-hoz képest. Megfigyeléseink szerint a burkot kb. 33 db téglából állította össze, melyből megadható már a burok nélküli aktivitás pontos nagysága:

$$A_0 = 1,07 \text{ Bq} + 33 \cdot 1,68 \text{ Bq} = (56,51 \pm 2,26) \text{ Bq} \quad (7)$$

Ahol a hibát a nyitott ajtajú rendszer hibája alapján számoltam.

-
- [1] Richard B Firestone és tsai. “The 8th edition of the Table of Isotopes”. *Proceedings of the 9th International Symposium on Capture gamma-ray spectroscopy and related topics. V. 2.* 1997.
 - [2] L.P. Ekström S.Y.F. Chu és R.B. Firestone. *The Lund/LBNL Nuclear Data Search.* 1999. URL: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>.
 - [3] Yasser Ebaid. “Use of gamma-ray spectrometry for uranium isotopic analysis in environmental samples”. *Rom Journ Phys* 55 (2010. jan.).
 - [4] Wang Baosong Huang Xiaolong. *LNE – LNHB/CEA Table de Radionucléides.* 2011. URL: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/U-235_tables.pdf.
 - [5] Wang Baosong Huang Xiaolong. *LNE – LNHB/CEA Table de Radionucléides.* 2010. URL: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Pa-234m_tables.pdf.

APPENDIX A. - AZ IZOTÓPARÁNY ÉS AZ AKTIVITÁS SZÁMÍTÁSA

APPENDIX A.1. AZ $^{235}\text{U} - ^{238}\text{U}$ ARÁNY SZÁMÍTÁSA

Az ^{235}U -höz tartozó magok részecskeszámának átlaga:

$$\overline{N}_{235\text{U}} = \frac{5,74 + 8,18 + 9,21 + 9,03}{4} \cdot 10^{18} = 8,04 \cdot 10^{18} \pm 5,97 \cdot 10^{17} \quad (8)$$

Míg az ^{238}U -hoz tartozó magok részecskeszámának átlaga:

$$\overline{N}_{238\text{U}} = \frac{1,94 \cdot 10^{21} + 1,61 \cdot 10^{21}}{2} = 1,78 \cdot 10^{21} \pm 9,82 \cdot 10^{19} \quad (9)$$

Ahol a hibákat az egyes izotópokhoz tartozó N értékek relatív hibáinak négyzetes összege alapján számoltam. Ezek felhasználásával már megadhatóvá válnak az izotópok relatív koncentrációi:

$$C_{235\text{U}} = \frac{8,04 \cdot 10^{18}}{8,04 \cdot 10^{18} + 1,78 \cdot 10^{21}} \approx 0,0045 = 0,45\% \quad (10)$$

$$C_{238\text{U}} = \frac{1,78 \cdot 10^{21}}{8,04 \cdot 10^{18} + 1,78 \cdot 10^{21}} \approx 0,9955 = 99,55\% \quad (11)$$

A két arány relatív hibája megegyezik a N relatív hibájával, így a hibával ellátott végeredmény:

$$C_{235\text{U}} = 0,0045 \pm 0,0003 = (0,45 \pm 0,03)\% \quad (12)$$

$$C_{238\text{U}} = 0,9955 \pm 0,0550 = (99,55 \pm 5,50)\% \quad (13)$$

Ahol a két koncentráció relatív hibáját az egyes izotópokhoz tartozó N részecskeszámok relatív hibáinak négyzetes összege adta.

APPENDIX A.2. A SÚLYOZOTT ÁTLAG SZÁMÍTÁSA

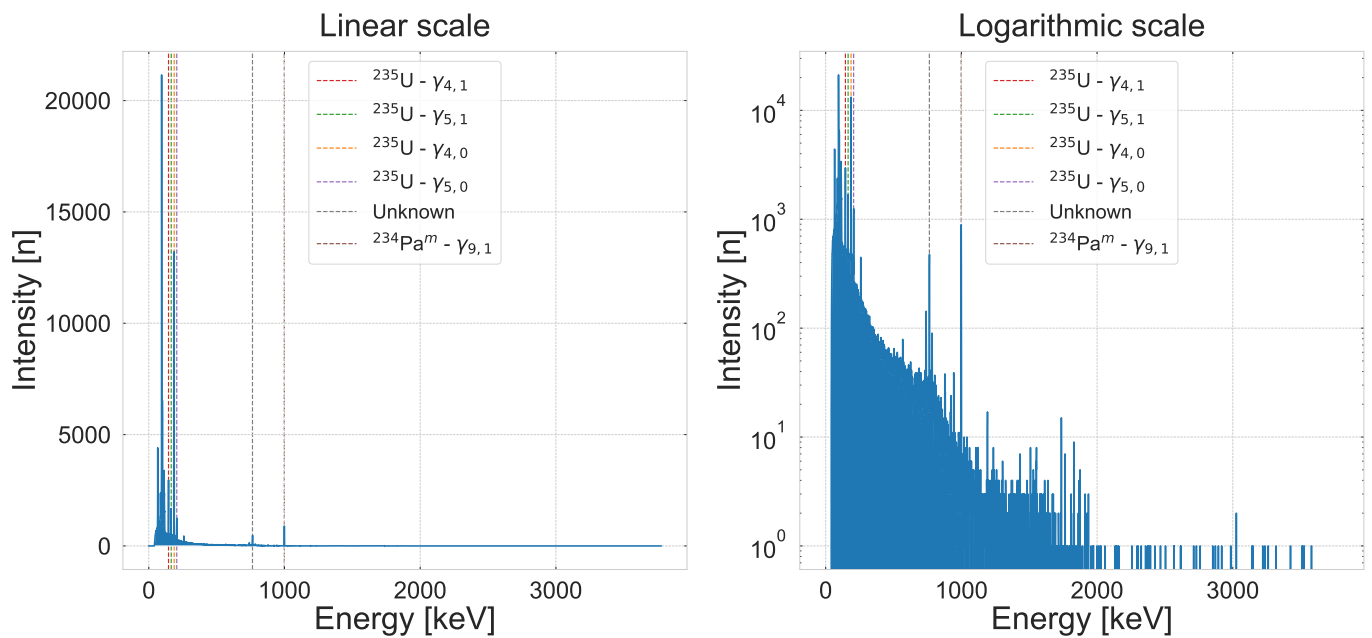
A minta teljes súlyozott aktivitása megkapható az alábbi számításból, felhasználva a 4. táblázatban található értékeket:

$$\begin{aligned} \langle A \rangle &= \frac{\frac{179,1 \text{ Bq}}{(5,8 \text{ Bq})^2} + \frac{255,2 \text{ Bq}}{(11,9 \text{ Bq})^2} + \frac{287,4 \text{ Bq}}{(6,5 \text{ Bq})^2} + \frac{281,8 \text{ Bq}}{(11,9 \text{ Bq})^2} + \frac{9554,6 \text{ Bq}}{(430,1 \text{ Bq})^2} + \frac{7939,6 \text{ Bq}}{(254,3 \text{ Bq})^2}}{\frac{1}{(5,8 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(11,9 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(6,5 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(11,9 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(430,1 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(254,3 \text{ Bq})^2}} = \\ &= \frac{16,189 \frac{1}{\text{Bq}}}{0,067 \frac{1}{\text{Bq}^2}} = 238,34 \text{ Bq} \end{aligned} \quad (14)$$

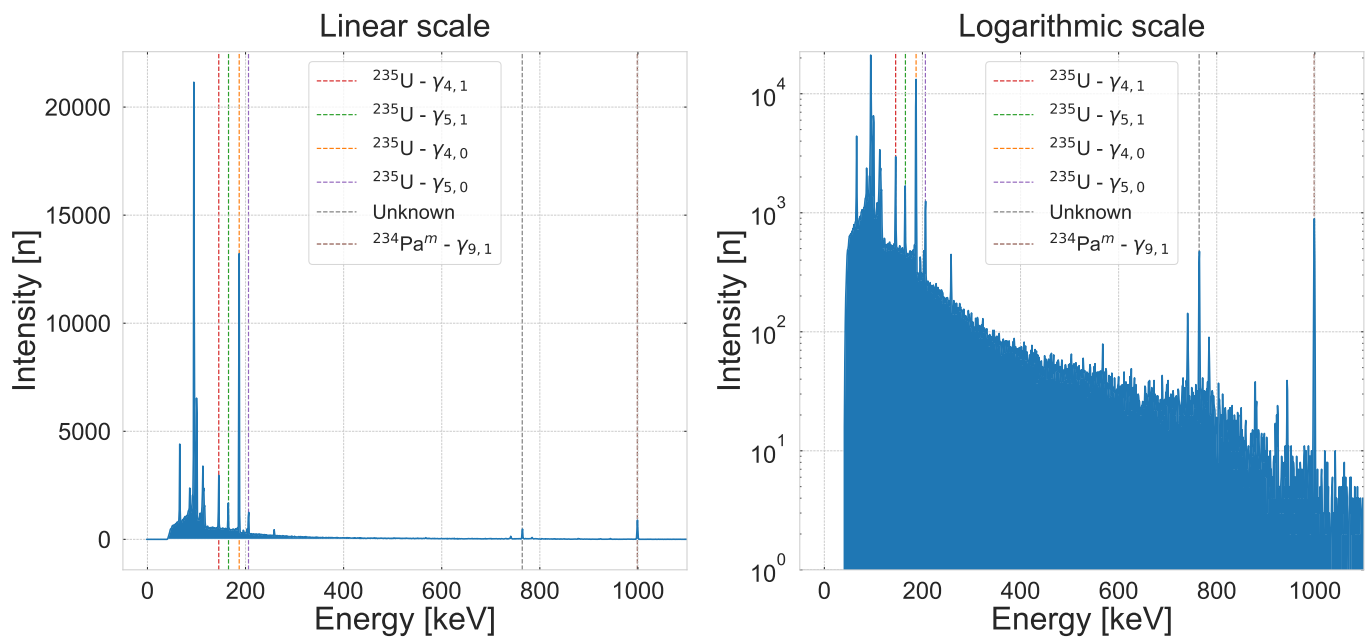
Ennek hibája megadható a következő módon:

$$\begin{aligned} \sigma_{\langle A \rangle} &= \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(5,8 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(11,9 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(6,5 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(11,9 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(430,1 \text{ Bq})^2} + \frac{1}{(254,3 \text{ Bq})^2}}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{0,067 \frac{1}{\text{Bq}^2}}} = 3,84 \text{ Bq} \end{aligned} \quad (15)$$

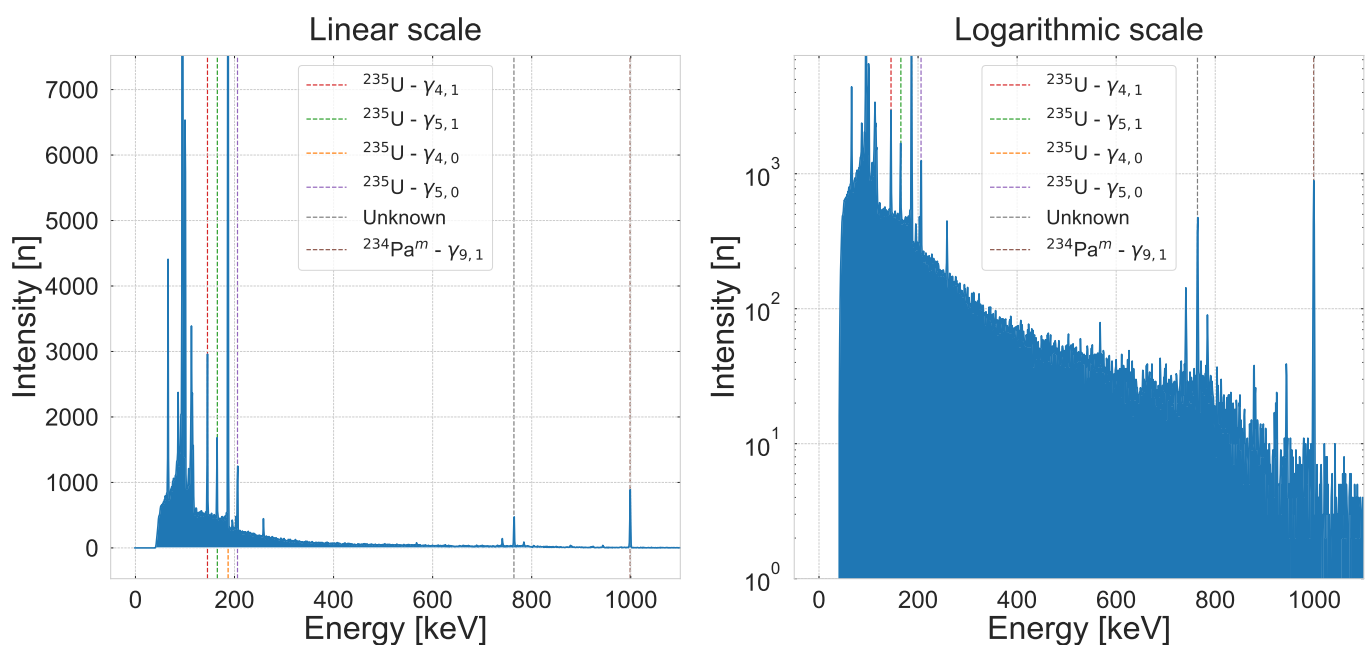
APPENDIX B. - ÁBRÁK



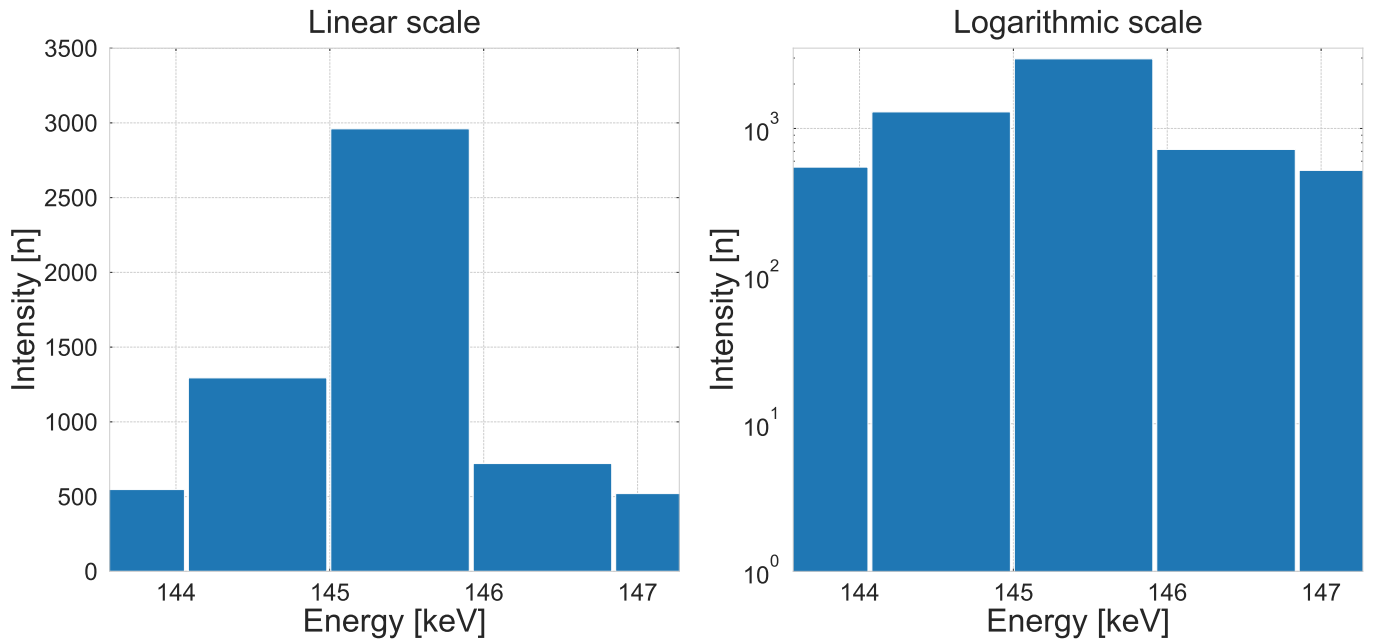
1. ábra. Az általam vizsgált anyag teljes lemért gamma-spektruma. Az egyes karakterisztikus csúcsok színes, szaggatott vonallal vannak jelölve.



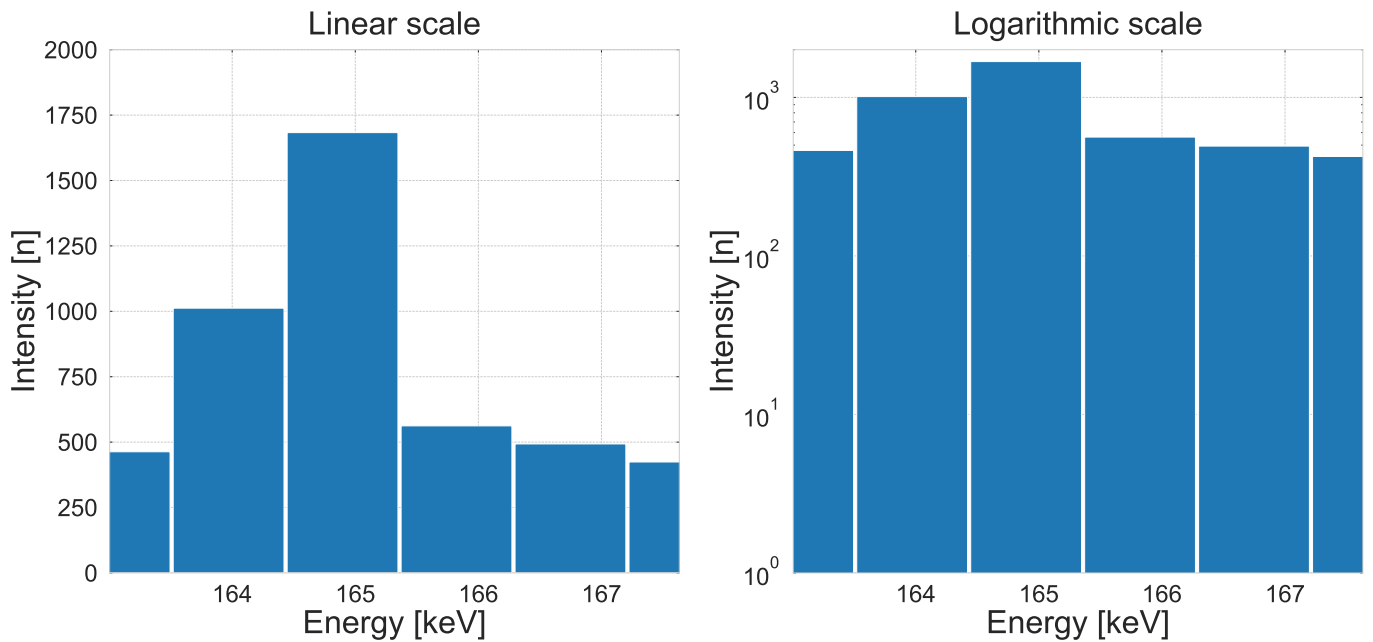
2. ábra. Az általam vizsgált anyag gamma-spektruma a 0 keV – 1100 keV intervallumban. Az egyes karakterisztikus csúcsok színes, szaggatott vonallal vannak jelölve.



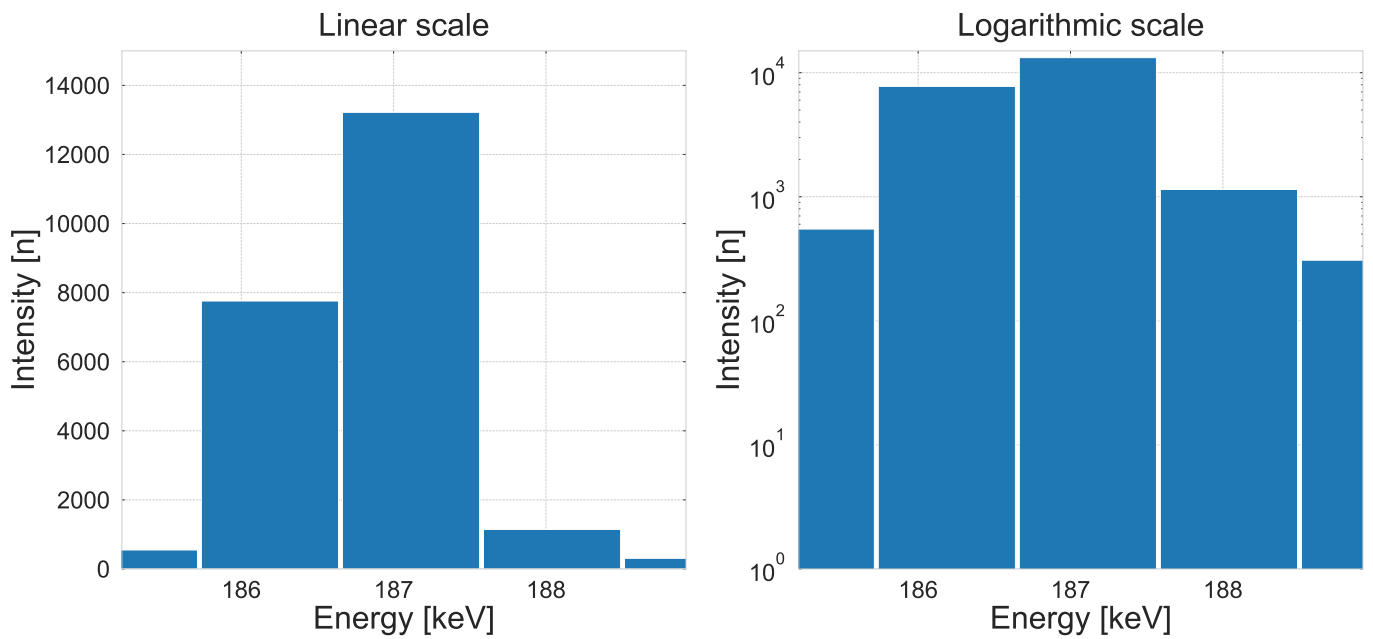
3. ábra. Az általam vizsgált anyag gamma-spektruma a 0 keV – 1100 keV intervallumban. Az ábrán a (2)-es ábrán szereplő y -tengely alsó harmada van megjelenítve. Az egyes karakterisztikus csúcsok színes, szaggatott vonallal vannak jelölve.



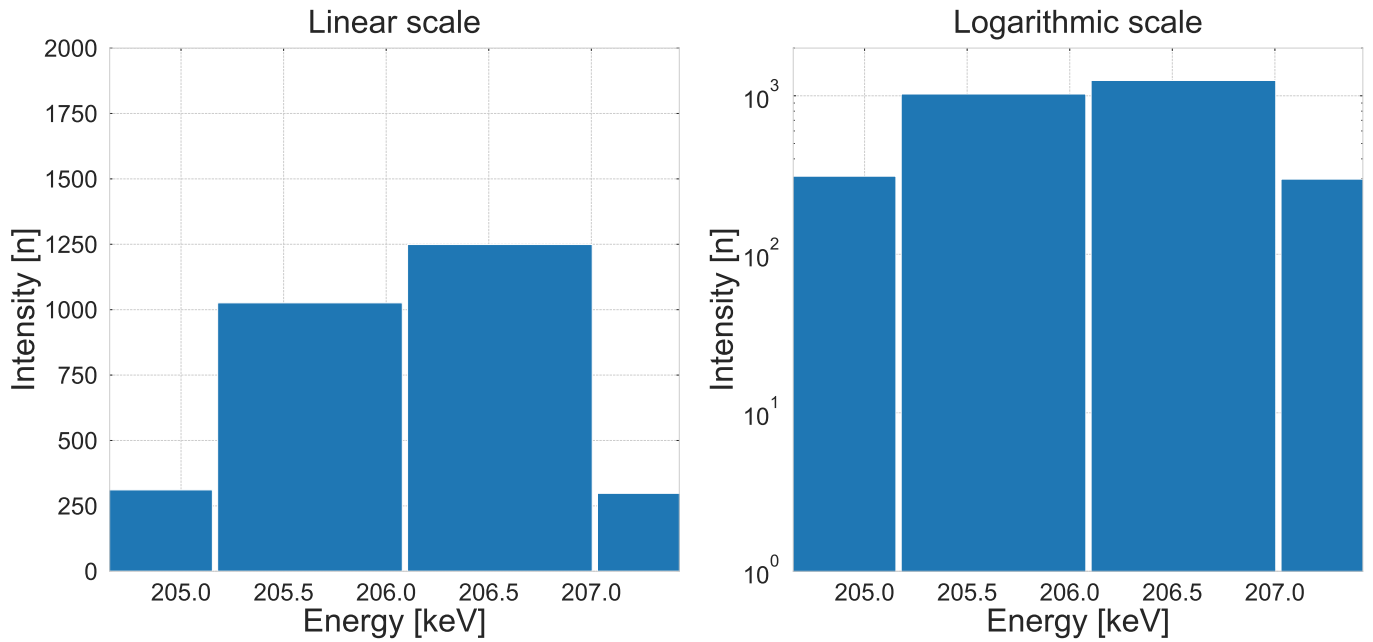
4. ábra. Az általam vizsgált anyag gamma-spektrumában található ^{235}U , $\gamma_{4,1}$ tranziensből származó fotonjának foto-csúcsa.



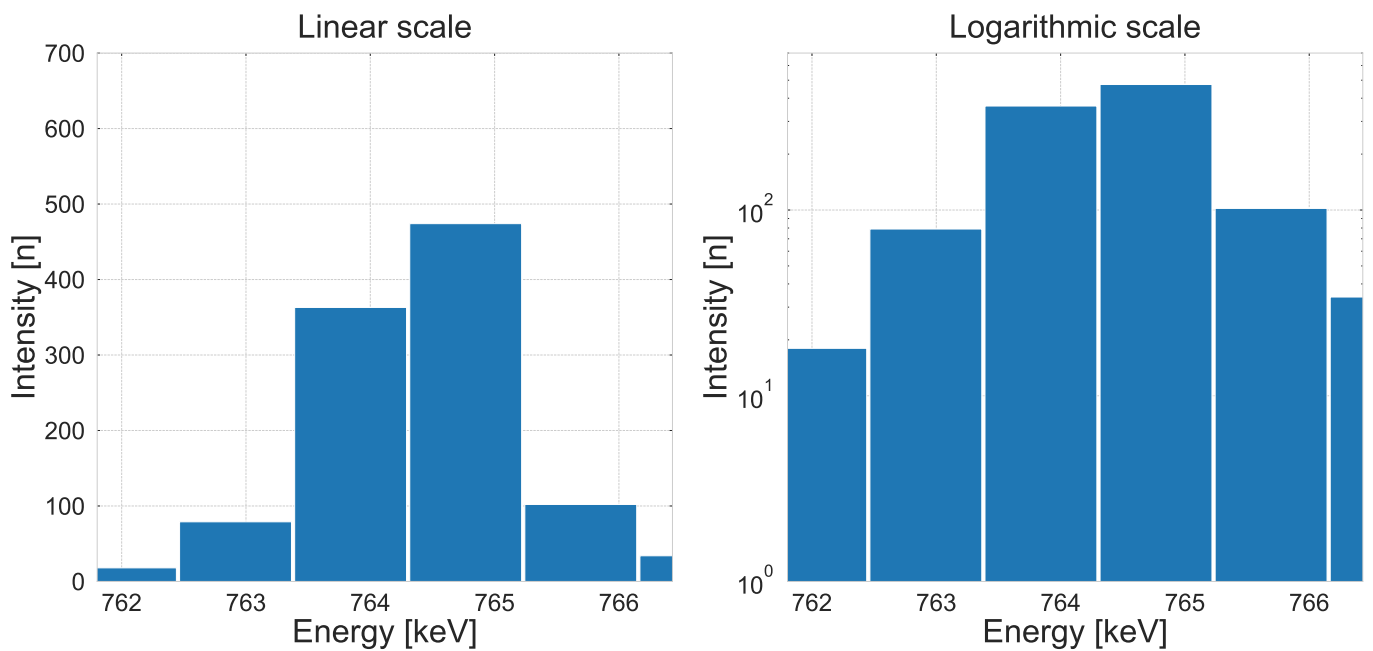
5. ábra. Az általam vizsgált anyag gamma-spektrumában található ^{235}U , $\gamma_{5,1}$ tranziensből származó fotonjának foto-csúcsa.



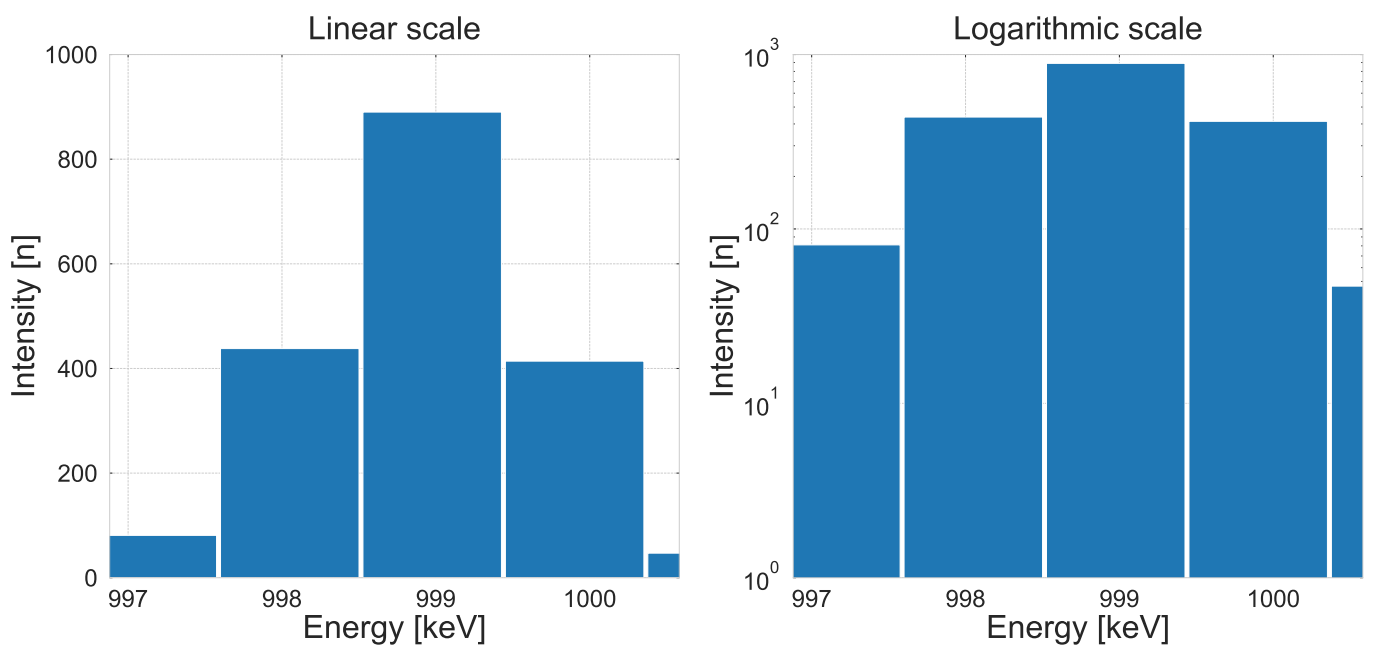
6. ábra. Az általam vizsgált anyag gamma-spektrumában található ^{235}U , $\gamma_{4,0}$ tranziensből származó fotonjának foto-csúcsa.



7. ábra. Az általam vizsgált anyag gamma-spektrumában található ^{235}U , $\gamma_{5,0}$ tranziensből származó fotonjának foto-csúcsa.



8. ábra. Az általam vizsgált anyag gamma-spektrumában található $^{234}\text{Pa}^m$, $\gamma_{4,1}$ tranziensből származó fotonjának foto-csúcsa.



9. ábra. Az általam vizsgált anyag gamma-spektrumában található $^{234}\text{Pa}^m$, $\gamma_{9,1}$ tranziensből származó fotonjának foto-csúcsa.

APPENDIX C. - TÁBLÁZATOK

Izotóp	Mért E_γ [keV]	Valós E_γ [keV]	Intenzitás [%]	Tranziens	$S_{\text{csúcs}}$	$\delta S_{\text{csúcs}}$ [%]
^{235}U	145, 28	143, 768	13, 20	$\gamma_{4,1}$	3375	2, 35
^{235}U	164, 75	163, 358	5, 855	$\gamma_{5,1}$	1976	4, 05
^{235}U	186, 79	185, 722	63, 41	$\gamma_{4,0}$	20836	0, 73
^{235}U	206, 10	205, 316	5, 465	$\gamma_{5,0}$	1666	2, 86
$^{234}\text{Pa}^m$	764, 24	766.708	$3, 29 \cdot 10^{-1}$	$\gamma_{4,1}$	914	3, 75
$^{234}\text{Pa}^m$	998, 77	1001, 441	$8, 56 \cdot 10^{-1}$	$\gamma_{9,1}$	1550	2, 16

1. táblázat. A gamma-spektrum kiértékelésekor vizsgált csúcsok adatai, $t = 1073$ s mérési idő és $N = 264077$ db detektált jel után ([Huang Xiaolong, 2011](#) és [Huang Xiaolong, 2010](#)).

Izotóp	E_γ [keV]	Intenzitás [%]	Felezési idő
^{243}Cm	760	0	29, 1 év
^{249}Cf	760	$2 \cdot 10^{-2}$	351 év
^{150}Eu	762, 03	$2, 8 \cdot 10^{-2}$	36.9 év
^{239}Pu	763, 61	$2.22 \cdot 10^{-8}$	24110 év
^{241}Am	763, 9	$2 \cdot 10^{-7}$	432.2 év
$^{110}\text{Ag}^m$	763, 944	22, 14	249.79 nap
^{152}Eu	764, 900	$2, 15 \cdot 10^{-1}$	13.537 év
^{160}Tb	765, 28	2, 140	72.3 nap
^{252}Es	765, 30	$1, 83 \cdot 10^{-1}$	471.7 nap
^{192}Ir	765, 8	$1, 49 \cdot 10^{-3}$	73.831 nap

2. táblázat. A 764.24 keV-es csúcsot okozható, 50 napnál hosszabb felezési idejű magok listája ([S.Y.F. Chu és Firestone, 1999](#))

Izotóp	Mért E_γ [keV]	η [%]	$\delta\eta$ [%]
^{235}U	145, 28	$1, 33059 \cdot 10^{-1}$	2, 218
^{235}U	164, 75	$1, 23267 \cdot 10^{-1}$	2, 336
^{235}U	186, 79	$1, 00812 \cdot 10^{-1}$	2, 129
^{235}U	206, 10	$1, 06556 \cdot 10^{-1}$	3, 085
$^{234}\text{Pa}^m$	764, 24	$2, 1255 \cdot 10^{-2}$	2, 491
$^{234}\text{Pa}^m$	998, 77	$2, 7098 \cdot 10^{-2}$	2, 365

3. táblázat. A detektor η hatásfoka az egyes foto-csúcsok energiatartományában

Izotóp	A [Bq]	ΔA [Bq]	δA [%]	λ (1/s)	N [db]	δN [%]
^{235}U	179, 1	5, 8	3, 23	$3, 12 \cdot 10^{-17}$	$5, 74 \cdot 10^{18}$	$= \delta A$
^{235}U	255, 2	11, 9	4, 68	$3, 12 \cdot 10^{-17}$	$8, 18 \cdot 10^{18}$	$= \delta A$
^{235}U	287, 4	6, 4	2, 25	$3, 12 \cdot 10^{-17}$	$9, 21 \cdot 10^{18}$	$= \delta A$
^{235}U	281, 8	11, 9	4, 20	$3, 12 \cdot 10^{-17}$	$9, 03 \cdot 10^{18}$	$= \delta A$
$^{234}\text{Pa}^m$	9554, 6	430, 1	4, 50	$4, 92 \cdot 10^{-18}$	$1, 94 \cdot 10^{21}$	$= \delta A$
$^{234}\text{Pa}^m$	7939, 6	254, 3	3, 20	$4, 92 \cdot 10^{-18}$	$1, 61 \cdot 10^{21}$	$= \delta A$

4. táblázat. Az egyes foto-csúcsokhoz tartozó aktivitás értékek, bomlási állandók, valamint részecskeszámok és ezek hibái

Pozíció	Mérés ideje [s]	N [db]	A [Bq]	δA [%]
Nyitott	100	275	2, 75	10
Zárt	601	642	1, 07	4

5. táblázat. A háttérsugárzás mérése során kapott értékek