

# Gamma spektroszkópia

Mérési jegyzőkönyv

Rudolf Ádám

Fizikus MSc.

**Mérőtársak:** Kozics György, Májer Imre

**Mérésvezető:** Csorba Ottó

**Mérés időpontja:** 2011. november 24.

**Leadás időpontja:** 2011. december 13.

## 1. Bevezető

Mérésünk során a gamma spektroszkópia alapjaival ismerkedtünk meg. Feladatunk egy gránit minta urántartalmának meghatározása, valamint annak kiderítése volt, hogy mennyi Rn szökött el belőle.

## 2. Kísérleti összeállítás

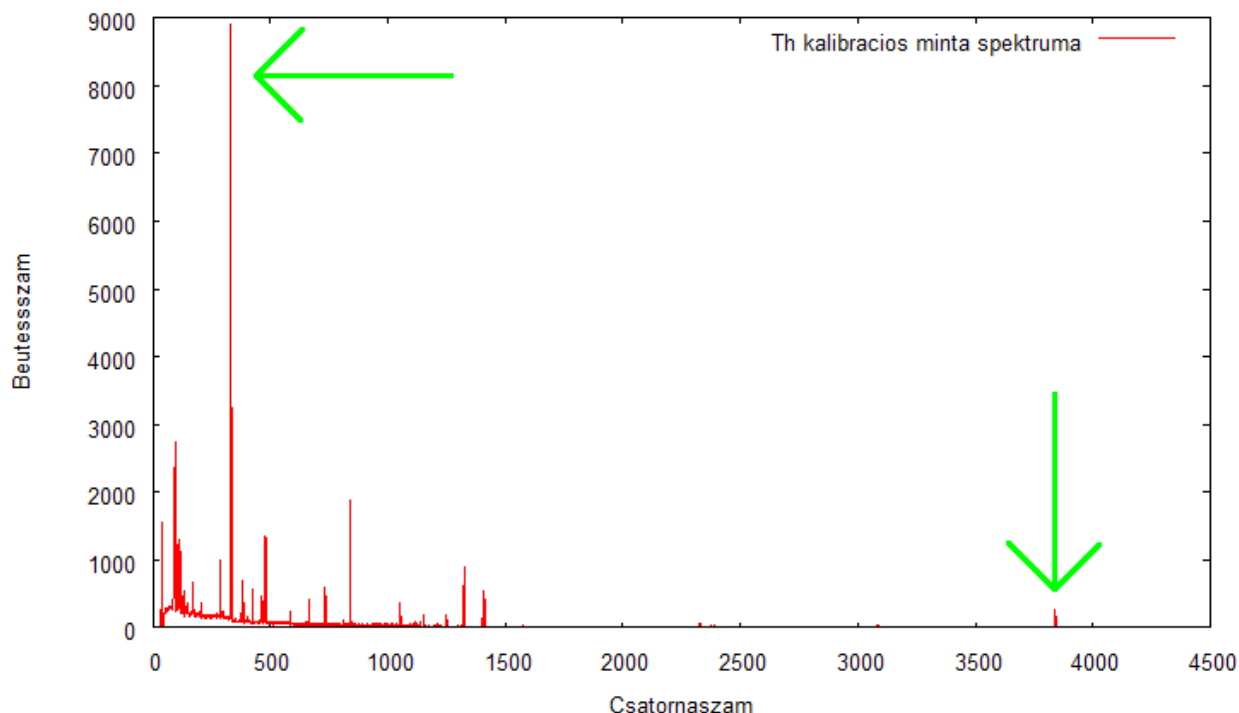
A mérést egy nagy tisztaságú germániumdetektorral végeztük, amely a kozmikus sugárzás zavaró hatását csökkentendő ólomfalakkal van körülvéve. A detektor hűtéséről egy alatta elhelyezett, forráspontján tartott folyékony nitrogénnel töltött tartály gondoskodik, ami a detektorral a jó hővezetés érdekében réz hengerrel van összekötve. A germániumdetektorra 3 kV-os nagyfeszültség volt rákötve, aminek jeleit egy erősítőn keresztül 93,8-szeres erősítéssel egy amplitúdó analízátor elemezte. Ez maximum 10V-os jeleket tud fogadni. Az analízátor  $2^{12}$  csatornába rendezte a fogott impulzusokat nagyságuk alapján lineárisan. (Hisztogrammot készített.) Ez az analízátor egy számítógéphez csatlakozik, ami tárolja az adatokat további feldolgozásra.

A teljes mérés során hárman összesen három mintát dolgoztunk föl: közönséges földet egy befőttesüvegben, közönséges homokot egy gógyszeresüvegben, valamint egy 50 mm átmérőjű, 50 mm magas, 281 g-os gránithengert, amivel ezen jegyzőkönyvben foglalkozom. A méretei meg voltak adva, de magam is meggyőződtem helyességükről.

## 3. Kalibráció

A mérőprogram a következőt csinálta: a már említett mind a  $2^{12} = 4096$  csatornához hozzárendelt egy (kezdetben nulla) egész számot, amit, ha az adott csatornához tartozó energián a rendszer egy beütést detektált, hozzáadott egyet. Mérés közben, és után ezeket a számokat (vagyis a spektrumot) ábrázolta is a csatornaszám függvényében, így kvalitatíve láthattuk, hogyan alakul ki a spektrum alakja, és meddig érdemes folytatni a mérést. A mérési időt a program rögzítette, és elmentette.

A hiteles számolás érdekében természetesen szükségünk volt a spektrumra az energia függvényében, vagyis minden csatornaszámhoz hozzá kellett rendelnünk egy energia értéket, egy - a feltételezés szerint lineáris - függvény szerint. Ehhez egy magas Th tartalmú gázhasrisnya mintát használtunk, aminek tulajdonságai nem fontosak, csak az, hogy hol vannak a karakterisztikus gamma csúcsai. Ezeket más emberek (mienkhez képest) pontos méréseiből ismerjük. A mérést elvégeztük, a spektrum az *1. ábrán* látható.



1. ábra. Tórium kalibrációs minta gamma spektruma a csatornaszám függvényében.

A spektrumból kiválasztottunk két csúcsot, a következő szempontok szerint: egyrészt környezetéhez képest nagyoknak kell lenniük, hogy jól azonosíthatóak legyenek, másrészt egymástól távol esőnek kell lenniük, hogy a kalibráció relatív hibáját minél kisebbre csökkentsük. Két pont alapján már el tudjuk végezni a lineáris kalibrációt. A kiválasztott két csúcsot az 1. ábrán nagy zöld nyíl jelzi. A mérőprogrammal először szemre azonosítottuk a két csúcs helyét (333, 3841) és félértékszélességét (3 és 5,25, átlagukat durván kerekítve 4-nek vettük) csatornaszám szerint, majd ezek alapján a program elvégezte a kalibrációt, sajnos hibásan, ám megadta a csúcsok pontosított helyét, ami nem feltétlenül egy adott csatorna közepére esik, így nem kell egésznek lennie. A következőket kaptuk: 332,24 és 3839,90 a csúcsok helyei, melyek ugyanebben a sorrendben a 238,624 keV és 2614,476 keV energiákhoz tartoznak a mérésvezetőtől kapott ábra alapján. Ezeket az értékeket beadva egy régebbi kiértékelő programba megkaptuk az immár helyes kalibrációs egyenes egyenletét:

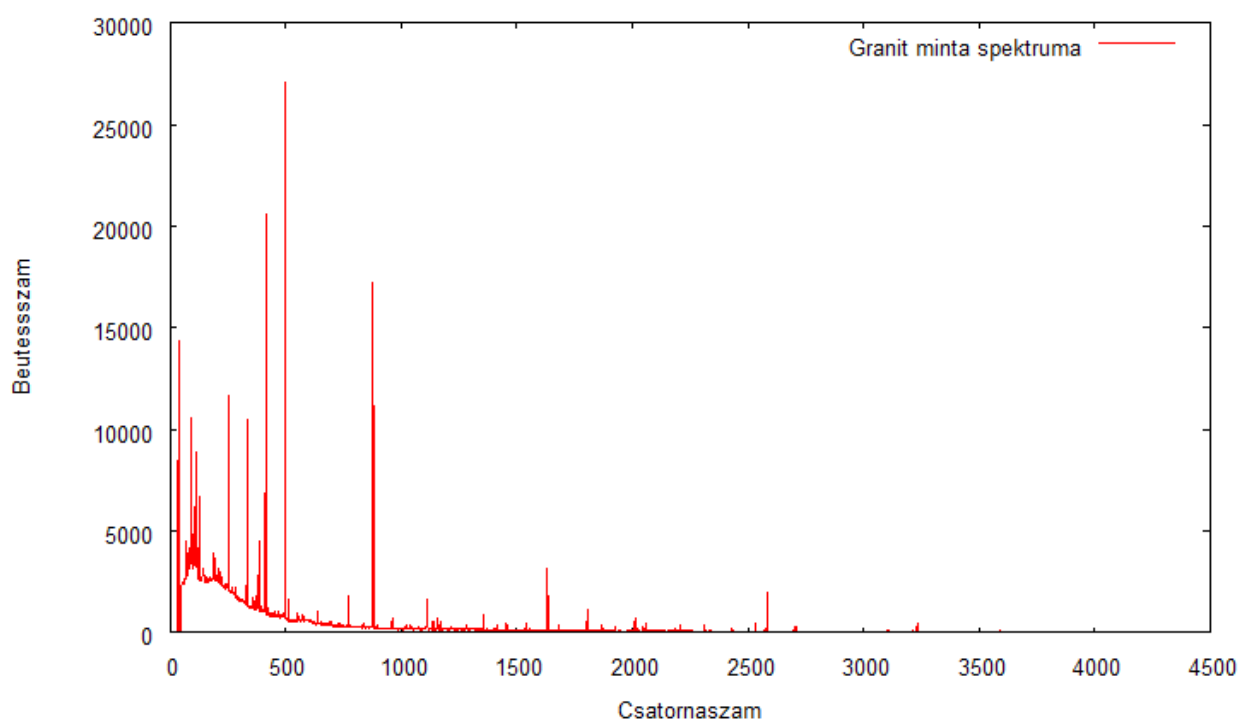
$$E = 0,677267 \cdot x + 13,09415$$

Ahol  $x$  jelöli a csatornaszámot. Későbbi számolásaimban az energiaértékek ezen a kalibráción alapszanak.

## 4. Gránit minta kiértékelése

### 4.1. Spektrum felvétele és csúcsok megkeresése

A sikeres kalibráció elvégzése után a többi mintát is behelyeztük az ólomfűlkébe, és felvettük spektrumukat (hogy teljesen pontosak legyünk, a föld minta mérése, alacsony aktivitása miatt a laborgyakorlat előtt elkezdődött). A számomra érdekes a gránit minta, aminek mérése  $t = 2303$  s ideig tartott. A spektrumát a 2. ábra mutatja.



2. ábra. Gránit minta felvett spektruma a csatornaszám függvényében. Látszik, hogy milyen sok csúcsa van.

Az előbb említett kiértékelő programmal végigfuttattunk rajta egy csúcskeresést, ami a következőképpen működik: megadunk neki egy fix félértékszélességet, és egy ilyen széles Gauss függvényt "végigtol" a spektrumon, illetve a többi paraméter szerint. Előre meg kell adni neki egy küszöbértéket is, aminél kisebb intenzitású csúcsot nem vesz figyelembe, különben a zaj miatt rengeteg irreleváns csúcsot találna. Miután azonosította a csúcsokat, egyenként végigvizsgáltuk őket, és pontosítottuk az illesztési paramétereket, szabadon engedve immár a félértékszélességet is, illetve hozzáadva még egy csúcsot, ha szemre látszott, hogy az illesztett gauss függvény alatt valójában két csúcs bújik meg. Miután láttuk, hogy a mért, és illesztett függvények különbsége ránézésre véletlenszerű, elégedetten hátradőltünk. Megtaláltuk a csúcsokat.

Mivel (ahogy az a 2. ábrán is látszik) a gránit mintánál a program nagyon sok csúcsot talált, a mérésvezető kijelölt 7 csúcsot, a jövőben ezek vizsgálatával fogom kiértékelni a spektrumot. Ezek rendre a következő energiájúak voltak: 186 keV, 241 keV, 294 keV, 351 keV, 609 keV, 1120 keV, 1764 keV. Ezek után ezekkel a számokkal fogok hivatkozni a csúcsokra (pl. **351**-es csúcs a 351 keV energiánál lévő csúcsot jelenti értelemszerűen). A csúcsok területeit az 1. táblázat tartalmazza.

## 4.2. Izotópok beazonosítása

A DECAY nevű program tartalmazza rengeteg izotóp gamma csúcsainak energiáit, és képes megadott energiára és hibahatárra kilistázni a szóbjöhető izotópokat. Becsült  $\pm 2\text{ keV}$  -es hibahatárral számolva kilistáztam mind a 7 csúcsához tartozó izotópokat, a következő megszorításokkal: a Np sorhoz tartozó izotópokat nem vettem figyelembe, mivel a Np felezési ideje kicsi a Föld életkorához képest, így mára ennek a bomlási sornak az elemei eltűntek. Csak a 200 és 238 közötti tömegszámú izotópokat tartottam meg, mivel e fölött nincsen anyaelem, ez alatt pedig már nagyjából csak stabil magok vannak. Kihúztam továbbá azokat az izotópokat is, amik 4-gyel való osztási maradékuk alapján a 3 megengedett bomlási sorba tartozhatnának, de vizsgálva az adott bomlási sort (szintén a DECAY program segítségével) abban nem találtam meg. A fennmaradó izotópokról a szekuláris egyensúly kialakulása miatt úgy tekintünk, hogy biztosan jelen vannak. Az így talált izotópokat az 1. táblázat tartalmazza.

Ezután az összes megtalált izotópra a jól bevált DECAY program segítségével kikerestem az intenzitásokat ( $I$ ), vagyis bomlási valószínűségeket is. (Szintén 1. táblázat.)

## 4.3. Hatásfok meghatározása

Az aktivitás kiszámításához szükségünk van a detektor detektálási hatásfokának meghatározására is, ami azt adja meg, hogy a mintában valóban végbemenő bomlások mekkora hányadát észleli a detektor. Ez igen összetett folyamatok eredményeként áll elő, elemi számításokkal nem sok esélyünk lenne kiszámolni. Függ a minta és a detektor egyedi, valamint egymáshoz viszonyított geometriájától (a nem a detektor felé eső térszögbe induló részecskéket pl. biztosan nem detektáljuk), attól, hogy a mintában magában mennyi részecske nyelődik el, hogy a detektorban hány részecske adja le a teljes energiáját, és hány húz rajta keresztül.

A hatásfok meghatározására írt program monte carlo szimulációs módszeren alapszik, ami azt jelenti, hogy a valósra hasonlító geometriájú mintában véletlenszerű helyeken, véletlenszerű irányokba kirepülő részecskéket kelt, és a fizikai folyamatokat ismervén követi azok útját. Sok részecske (akár milliós nagyságrendű) leszimulálása után egyszerűen megszámlolja, hogy az összesből mennyi adta le teljes

energiáját a detektorban, közben pedig statisztikus hibát számol. Ismernie kell a (feltétlen hengeres) minta geometriáját: ez a már említett 25 mm-es sugár és 50 mm-es magasság, azaz  $98,1 \text{ cm}^3$ -es térfogat, valamint összetételét. Ezt  $\text{SiO}_2$ -nak vettem, aminek moláris tömege  $60 \frac{\text{g}}{\text{mól}} = (28 + 2 \cdot 16) \frac{\text{g}}{\text{mól}}$ . A minta sűrűsége  $\frac{281 \text{ g}}{98,1 \text{ cm}^3} = 2,86 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , a molekulák számsűrűsége pedig:  $\frac{2,86 \text{ mól}}{60 \text{ cm}^3} = 0,0476 \frac{\text{mól}}{\text{cm}^3}$ .

A szimulációt addig folytattuk, amíg a program által becsült hiba 1% körülire nem csökkent, ám mivel ez összetett folyamatok eredménye, és nehéz megbecsülni, a mérésleírás tanácsa alapján 7%-nak vettem.

A hatások energiafüggő, így minden csúcshoz tartozik egy érték. Ezeket az értékeket az *1. táblázat* tartalmazza. Mivel állandó hibájúnak vettem őket, a hibák nincsenek feltüntetve a táblázatban.

#### 4.4. Aktivitások kiszámolása

Az aktivitásokat és hibájukat a következő képlettel kaphatjuk meg:

$$A = \frac{N}{\eta \cdot I \cdot t}, \quad \delta A = A \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta}{\eta}\right)^2}$$

Ahol  $N$  a nettó csúcsterület,  $\eta$  a hatások,  $I$  az intenzitás,  $t$  pedig a mérés ideje, valamint  $\frac{\delta \eta}{\eta} = 0,07$  mindig.

A szekuláris egyensúly beállt, így az egy bomlási sor radon előtti, vagy radon utáni izotópjainak aktivitása megegyezik. Erre támaszkodva előfordulhat, hogy egy izotóp aktivitását ismerjük, de a hozzá tartozó nettó csúcsterületet nem. Ekkor a fenti képletekből kiindulva:

$$N = A \cdot \eta \cdot I \cdot t, \quad \delta N = N \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\delta \eta}{\eta}\right)^2}$$

Ha a nettó csúcsterület nem ismert, de a csúcshoz tartozó izotópok egy bomlási sorhoz tartoznak, valamint mind a Rn előtt, vagy mind utána foglal helyet a bomlási sorban, akkor a teljes csúcs területét szét lehet osztani az intenzitások arányában. Ha ezt nem tehetjük meg, akkor is támaszkodhatunk arra, hogy a nettó csúcsterületek összege a teljes csúcsterület ( $N_{\text{er}}$ -rel jelölve az *1. táblázatban*). Így ha csak egy hiányzik, azt kivonással meghatározhatjuk.

E	Elem	Sor	$\eta$	I	$N_{er}$	$\delta N_{er}$	N	$\delta N$	A	$\delta A$
186	<sup>223</sup> Fr	<sup>235</sup> U	0,0329	0,002853	21141	324			365	36
	<sup>234</sup> Pa	<sup>238</sup> U		0,020400					15804	2479
	<sup>226</sup> Ra	<sup>238</sup> U		0,032800					15804	2479
	<sup>227</sup> Th	<sup>235</sup> U		0,017273					365	36
	<sup>235</sup> U	<sup>235</sup> U		0,540000					365	36
241	<sup>214</sup> Pb	<sup>238</sup> U	0,0276	0,074913	17064	280	16580	1161	3480,10	0,036
	<sup>224</sup> Ra	Th		0,039500						
	<sup>226</sup> Th	<sup>238</sup> U		0,008700					15804	2479
294	<sup>234</sup> Pa	<sup>238</sup> U	0,0232	0,039780	37399	319	33560	4712	15804	2479
	<sup>214</sup> Pb	<sup>238</sup> U		0,019247			3576	250	3480,10	0,036
	<sup>223</sup> Ra	<sup>235</sup> U		0,013533			264	32	365	36
351	<sup>211</sup> Bi	<sup>235</sup> U	0,0201	0,129450	62078	382	2185	154	365	36
	<sup>234</sup> Pa	<sup>238</sup> U		0,006120						
	<sup>214</sup> Pb	<sup>238</sup> U		0,372100			59893	4193	3480,10	0,036
	<sup>223</sup> Ra	<sup>235</sup> U		0,003400						
	<sup>227</sup> Th	<sup>235</sup> U		0,001180						
609	<sup>214</sup> Bi	<sup>238</sup> U	0,0126	0,462810	43879	310	43762	309	3268	230
	<sup>218</sup> Rn	<sup>238</sup> U		0,001240			117	1	3268	230
1120	<sup>214</sup> Bi	<sup>238</sup> U	0,00721	0,151470	8924	147	8924	147	3548	255
1764	<sup>214</sup> Bi	<sup>238</sup> U	0,00495	0,158380	6969	122	6969	122	3857	278

1. táblázat. A vizsgált csúcsokhoz tartozó izotópok, hatásfokok, intenzitások, teljes és nettó területek, és aktivitások.

A leírt számításokat elvégeztem, az eredményeket, és a hozzájuk szükséges adatokat az 1. táblázat tartalmazza. Ennek jelölései: a bal oldali oszlopban a csúcse energiák láthatóak keV-ben megadva. A különböző csúcsokhoz tartozó sorok vastag vonallal vannak elválasztva. Minden sor egy izotópot reprezentál: ez látható a második oszlopban **Elem** néven. Ezen cellák háttérszíne zöld, ha az izotóp a Rn előtt, és piros, ha a Rn után következik saját bomlási sorában (a Rn természetesen piros, mert a szekuláris egyensúly szempontjából az utána lévőkhöz tartozik az aktivitása miatt). A harmadik oszlop a **Sor** feliratú: ez azt jelzi, hogy az izotóp melyik bomlási sorba tartozik. A sorok háttérszíne ehhez igazodik: a kék a <sup>235</sup>U, a sárga a <sup>238</sup>U, a narancssárga pedig a Th bomlási sorához tartozó izotópokat jelzi. A szürke mezőkről később, a megfelelő helyen szólok.  $N_{er}$  az eredeti,  $N$  pedig a szétbontott csúcsterületeket jelöli. Az aktivitás, és hibája 1/s, azaz Bq mértékegységben van megadva.

A táblázatot sok lépésben töltöttem ki a fentebb leírt szabályok alapján. Lépésről-lépésre a következőket csináltam:

- A tömegszám négygyel való osztási maradéka alapján meghatároztam, hogy melyik elem melyik bomlási sornak része.
- Közvetlenül beírtam az **1120**-as, valamint az **1764**-es csúcsok területét ( $N$ ).
- Az intenzitások arányában felosztottam a **609**-es csúcs területét. A relatív hibák megmaradtak.
- Az ismert területű csúcsokra (**609**, **1120**, **1764**) kiszámoltam  $A$ -t a megfelelő képlettel.
- Azonosítottam a **241**-es, **294**-es és **351**-es csúcsok ólom aktivitását az ismert  $^{238}\text{U}$  aktivitások relatív hibák négyzetének reciprokával súlyozott átlagaként, mert ugyanabba a bomlási sorba tartoznak, és mindegyik a radon után jön:

$$\langle A \rangle = \frac{\sum_i A_i / \sigma_i^2}{\sum_i 1 / \sigma_i^2}, \quad \frac{1}{\sigma_{\langle A \rangle}^2} = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad \text{ahol} \quad \sigma_A = \frac{\delta A}{A}$$

- Meghatároztam ugyanezen elemhez tartozó  $N$ -eket az előbbi 3 csúcsra.
- Mivel az ismert adatok alapján elvileg nem tudunk újabb adatokat meghatározni, közelítéshez folyamodtam: a **351**-es csúcsnál látszik, hogy a Pa, Ra és Th elemek intenzitása százalék nagyságrendű a Bi és Pb intenzitásához képest, így e 3 elemet elhanyagoltam, mintha ott sem lennének. Így már  $N_{er}$  és az ólom  $N$ -je különbségeként ki tudtam számolni a bizmuthoz tartozó  $N$ -et. Az elhanyagolt izotópok sorait sötétszürke háttérrel jelöltem.
- Ebből már meg tudtam határozni a Bi aktivitását is a megszokott módon.
- A szekuláris egyensúlyban bízva így már ismerem az  $^{238}\text{U}$  bomlási sornak radon előtti tagjainak aktivitását. (Mellegleg ebből a sorból csak Rn előtti találtam.) Ebből meg tudom adni a **186**-os, valamint a **294**-es csúcsok esetében a bomlási sorhoz tartozó aktivitásokat.
- Szokásos módon ebből meghatároztam a hozzájuk tartozó  $N$ -t a **294**-es csúcsnál. (A **186**-osnál nem lesz erre szükség.)
- Jelen állapotban a **294**-es csúcsnál csak a Pa-hoz tartozó csúcsterület ismeretlen, így  $N_{er}$ -ből kivonva a másik kettőt, ezt is meghatároztam.
- A Pa-hoz tartozó  $N$  ismeretében meghatároztam az aktivitását.
- Ez megegyezik a többi  $^{238}\text{U}$  bomlási sorba tartozó, radon előtti elem aktivitásával, így ezeket is beírtam.

A táblázatban így is maradtak kitöltetlen részek, amiket hasonló elvek alapján meg lehetne határozni, de céljaink szempontjából lényegtelenek, így ezeket nem számoltam ki. Ezeket a táblázatban világosszürke cellák jelzik.



#### 4.5. Feladat: mennyi Rn szökött meg a mintából?

Mivel a radon légnemű, elszökik a mintából, tönkretéve a szekuláris egyensúlyt azt két részre osztja: a radon előtti elemeknek magasabb az aktivitása, a radon elszökik, így lecsökken az aktivitása, meghatározva az utána jövő izotópokat is. Így olyan, mintha két külön bomlási sorra válna egy. Ezt figyelembe véve alakítottam ki a fenti táblázatot. Látszik a  $^{238}\text{U}$  bomlási sor esetében, hogy a Rn előtti elemek aktivitása sokkal nagyobb. Azt kellene meghatároznunk, hogy a mintánk esetében a radon mekkora hányada illant el.

Az aktivitás egyenlő a következő kifejezések, minden  $i$  izotópra:

$$A_i = \lambda_i N_i$$

Szekuláris egyensúly fennálta esetén ezek minden  $i$ -re egyenlők egymással is. Ha semennyi radon nem szökött volna meg a markunkból, a radonra is állna: aktivitása egyenlő lenne az előtte lévő atomok aktivitásával. Jelöljük ezt az állapotot így:  $A_{Rn}^{szek} = \lambda_{Rn} N_{Rn}^{szek}$ , ami azt jelzi, mi lenne, ha az összes radon jelen lenne. Ekkor a megmaradt Rn aránya:

$$\frac{A_{Rn}}{A_{Rn}^{szek}} = \frac{\lambda_{Rn} N_{Rn}}{\lambda_{Rn} N_{Rn}^{szek}} = \frac{N_{Rn}}{N_{Rn}^{szek}} = \frac{A_{Rn}}{A_{Pa}} = \frac{2368 \cdot 1/s}{15804 \cdot 1/s} = 0,2068$$

Az elveszett Rn aránya:

$$1 - \frac{N_{Rn}}{N_{Rn}^{szek}} = 0,79322 \quad , \text{ hibája: } \delta \left( 1 - \frac{N_{Rn}}{N_{Rn}^{szek}} \right) = \left( 1 - \frac{N_{Rn}}{N_{Rn}^{szek}} \right) \cdot \left( \frac{\delta A_{Rn}}{A_{Rn}} + \frac{\delta A_{Pa}}{A_{Pa}} \right) = 0,18$$

Vagyis a radon

$$1 - \frac{N_{Rn}}{N_{Rn}^{szek}} = 0,8 \pm 0,18 \quad \text{hányada ment ki a mintából.}$$

#### 4.6. Minta urántartalmának meghatározása

A mintánk uránaktivitása  $A_{235\text{U}} = (365 \pm 36) 1/s$  a 235-ös tömegszámú izotópra vonatkoztatva. Tömege 281 g, vagyis uránaktivitása tömegegységekre vonatkoztatva:

$$A_{\text{fajlagos}} = \frac{365}{0,235 \text{ kgs}} = (1553 \pm 153) \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$$