

Reaktorfizikai mérések

Későneutron-paraméterek vizsgálata, uránkoncentráció meghatározása

Asztalos Bogdán, Kadlecik Ármin, Körtefái Dóra

Mérés időpontja:
2020.07.27.



Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Elméleti áttekintés	2
2.1. Későneutronok keletkezése	2
2.2. Későneutron-csoportok	2
2.3. Ismeretlen minta urántartalmának meghatározása	3
3. Mérés menete	3
3.1. Későneutron paraméterek meghatározása	3
3.2. Urántartalom meghatározása	4
4. Mérési adatok kiértékelése	4
4.1. Későneutron paraméterek meghatározása	4
4.2. A kapott eredmények diszkussziója	8
4.3. Urántartalom meghatározása	8
5. Összegzés	8

1. Bevezetés

A jegyzőkönyvben a BME tanreaktorában felvett adatok kiértékelésén dolgoztunk. Egyik célunk a mérhető későneutron-csoportok relatív intenzitásának és az anyamagok átlagos felezési idejének meghatározása volt. Ezt követően egy ismeretlen urántartalmú minta uránkoncentrációját határoztuk meg két uránstandard felhasználásával.

2. Elméleti áttekintés

2.1. Későneutronok keletkezése

A hasadás során a legtöbb neutron a hasadást követően 10^{-12} s-on belül keletkezik. Azonban az összneutronszám 0,64%-a csak jelentős idővel (akár percekkel) a hasadás után jelenik meg. Ezeknek az ún. késő neutronoknak hatalmas szerepük van a reaktorok szabályozhatóságában.

Késő neutronok akkor keletkeznek, ha olyan elem képződik a β -bomlások során, aminek a gerjesztési energiája meghaladja a neutron szeparációs energiáját. Ekkor a Z rendszámú és N neutrons számú későneutron anyamagból $Z + 1$ rendszámú és $N - 1$ neutrons számú gerjesztett későneutron emitter keletkezik, ami kibocsátja a neutront.

2.2. Későneutron-csoportok

A későneutron-anyamagok felezési ideje széles skálán mozog, már 66 anyamagot azonosítottak be, 0,12s – 78s közötti felezési idővel. Ilyen nagy számú, különböző felezési idejű anyamagot külön kezelni lehetetlen lenne, a differenciál-egyenletrendszer túlságosan bonyolulttá válna, illetve az egyes anyamagok felezési idejét és részarányát sem ismerjük kellően pontosan. Ezen nehézségek kezelésére G. R. Keepen későneutron-csoportokat hozott létre. Felezési idejük alapján az anyamagokat hat csoportba sorolta. Az ^{235}U esetén a későneutron-csoportok adatait a 1. táblázat tartalmazza.

i	késő neutronok lehetséges anyagai	közepes energia [MeV]	anyamagok átlagos felezési ideje [s]	késő neutronok részaránya az összes neutronhoz képest
1	$^{87}\text{Br}, ^{142}\text{Cs}$	0,25	55,72	0,021 %
2	$^{137}\text{I}, ^{88}\text{Br}$	0,56	22,72	0,140 %
3	$^{138}\text{I}, ^{89}\text{Br}, ^{(93,94)}\text{Rb}$	0,43	6,22	0,126 %
4	$^{139}\text{I}, ^{(93,94)}\text{Kr}, ^{143}\text{Xe}, ^{(90,92)}\text{Rb}$	0,62	2,3	0,252 %
5	$^{140}\text{I}, ^{145}\text{Cs}$	0,42	0,61	0,074 %
6	(Br, Rb, As stb.)	-	0,23	0,027 %

1. táblázat. A későneutron-csoportok adatai ^{235}U esetén

A csoportok felhasználásával felírhatjuk a késő neutronok keletkezésének időbeli alakulását.

$$S_k(t) = n_f \sum_{i=1}^6 \nu_{ki} \lambda_{ki} e^{-\lambda_{ki} t}$$

Ahol ν_{ki} az i -edik későneutron-csoport hozama, λ_{ki} az i -edik későneutron-csoport bomlási állandója.

2.3. Ismeretlen minta urántartalmának meghatározása

A besugárzott urán bomlászövegét az $S_k(t) = n_f \sum_{i=1}^6 \nu_{ki} \lambda_{ki} e^{-\lambda_{ki} t}$ függvény írja le. Különböző minták esetén az eltérés az n_f együtthatókban van, ezért a későneutron-görbék bármely szakaszának összevetése alkalmas a minták összehasonlítására is. A nagyobb pontosság elérése érdekében összegzünk intenzitásokat különböző, illetve figyelniünk kell arra is, hogy a görbék elején még a minták oxigéntartalma is módosíthatja az értékeket. Ugyanis az $^{17}\text{O}(n, p)^{17}\text{N}$ reakció során ^{17}N , 4,1 s felezési idejű neutronemitter keletkezik. Érdekes a 20-80 s közötti intervallumot választani, a 22,72 s felezési idejű későneutron-csoport hozama elegendően nagy, és jelentősen kiemelkedik a háttérből ezen az időintervallumon.

Jelöljük m -el a tömegeket, a standardokra vonatkozó impulzusszámok összegét N_{S7} -tel és N_{S8} -cal, az ismeretlen minta impulzusösszegét N_x -el, valamint a háttérrel H_x -el. Előbbi megfontolásaink alapján:

$$N_{S7} = \sum_{i=20}^{80} n_{i,S7}; \quad N_{S8} = \sum_{i=20}^{80} n_{i,S8}; \quad N_x = \sum_{i=20}^{80} n_{i,x}; \quad H_x = \sum_{i=20}^{80} n_{i,H};$$

Ahol n_i az i -edik csatorna tartalma.

Feltételezzük továbbá, hogy az uránkoncentráció arányos a fajlagos beütésszámmal, azaz:

$$\frac{N - H}{m} = a \cdot C$$

Az a paraméterre a standardok alapján adhatunk becslést. Egy standard alapján a paraméter és szórásnégyzete, feltéve, hogy a beütésszámok Poisson-eloszlást követnek:

$$a = \frac{N_{std} - H_{std}}{m_{std} C_{std}}; \quad \sigma_a^2 = a^2 \left(\frac{N_{std} + H_{std}}{(N_{std} - H_{std})^2} + \frac{\sigma_{C_{std}}^2}{C_{std}^2} \right)$$

Pontosabb eredményt kaphatunk, ha két standard alapján határozzuk meg a paramétert. Mindkét standardra elvégezzük a fenti számítást, majd kiszámoljuk a súlyozott átlagát és szórásnégyzetét:

$$\tilde{a} = \frac{\sum_{i=1}^2 a_i / \sigma_{ai}^2}{\sum_{i=1}^2 1 / \sigma_{ai}^2}; \quad \sigma_a^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^2 1 / \sigma_{ai}^2}$$

Ezek alapján az ismeretlen minta uránkoncentrációjára:

$$C_x = \frac{N_x - H_x}{m_x \tilde{a}}; \quad \sigma_{C_x}^2 = C_x^2 \left(\frac{N_x + H_x}{(N_x - H_x)^2} + \frac{\sigma_a^2}{\tilde{a}^2} \right)$$

3. Mérés menete

3.1. Későneutron paraméterek meghatározása

A távoktatás miatt a mérést nem mi végeztük el, a főbb lépéseket videókon nézhettük meg, illetve egy korábbi mérés adatait kaptuk meg feldolgozás céljából.

A reaktor aktív zónájába a csőposta segítségével jutott az urán fóliát tartalmazó tok.

A mintát 3 percig 1 kW teljesítménnyel sugározták be. A besugárzási idő után automatikusan a mérőpozícióba kerül a minta, ahol 6 db, párhuzamosan kapcsolt ^3He öltésű neutron-számláló van elhelyezve, hogy nagyobb térszögben tudjanak detektálni. A detektorban a neutronok ^3He -mal való ütközése során trícium és proton keletkezett, ezeket a részecskéket tudtuk észlelni. A spektrumokból le kellett vágni a γ beütésekből származó csúcsot, eredményképp pedig egy fájlt kaptunk, amiben másodpercenként fel volt tüntetve az aktuális beütésszám.

3.2. Urántartalom meghatározása

A csőpostán keresztül a reaktorba jutatott ismeretlen mintát és a két uránstandardot 10 kW teljesítménnyel, három percig sugározták be. A használt uránstandardok adatait a 2. táblázatban foglaltuk össze.

jel	U-koncentráció átlagértéke [tömeg%]	teljes tömeg
S7	$0,501 \pm 0,013$	93,3
S8	$0,135 \pm 0,0035$	85,1

2. táblázat. Az uránstandardok adatai

Az ismeretlen uránkoncentrációjú minta tömege 105,5 mg volt. A háttér méréséhez egy üres tok esetén is elvégezték a mérést. Ahhoz, hogy megbízható eredményeket kapjunk, a különböző mérésekhez tartozó hűtési időeknek is meg kell egyezniük, de ezt a csőpostarendszer jól teljesíti.

4. Mérési adatok kiértékelése

4.1. Későneutron paraméterek meghatározása

Elméleti megfontolások alapján tudjuk, hogy az idő függvényében ábrázolt beütésszám csökkenő exponenciális függvények összege lesz. A fájl első pár értéke nem volt releváns, a maximálisnál kisebb beütésszámokat tartalmazott. Ezek eldobása után ábrázoltuk az adatokat, ez az 1. ábrán látható.

Az ábra alátámasztja a várt függvényalakot, és azt is megállapíthatjuk, hogy a mérés megkezdése után 350 s-mal már alig tért el a nullától a beütésszám. Először a leghosszabb felezési idejű komponens paramétereit határozzuk meg. Ehhez vesszük a beütésszámok logaritmusát, és kiválasztjuk azt az időintervallumot, ahol a rövidebb felezési izotópok hatása már nem észlelhető, de a beütésszámok még kiemelkednek a háttérből. Ezt a legkésőbbi egyenes szakasz határozza meg.

Az utolsó szakasz 220 s és 360 s között található, az illesztett egyenes egyenlete:

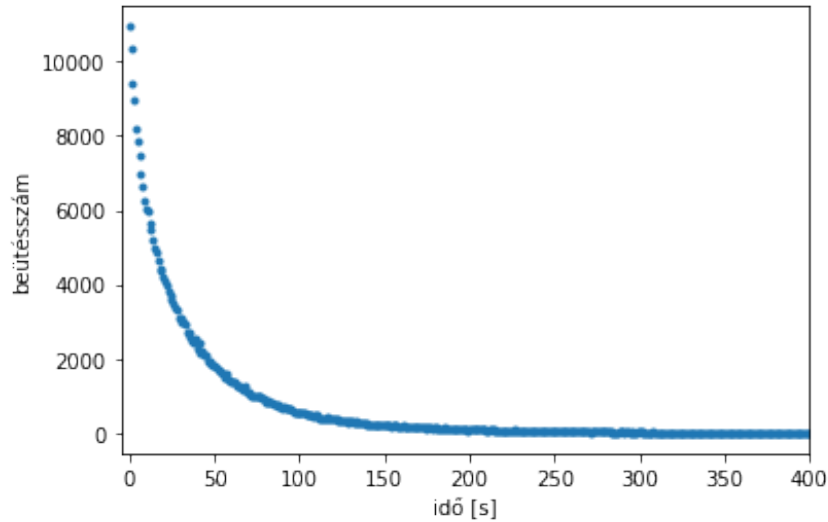
$$f_1(x) = (-0,01288 \pm 0,00047)x + (7,134 \pm 0,138)$$

Az egyenes meredekségének abszolút értéke a bomlási állandónak felel meg, azaz:

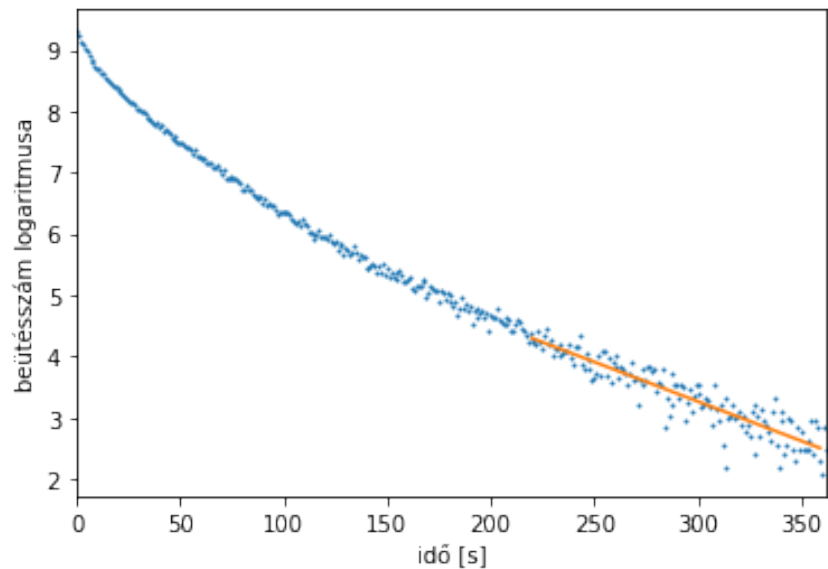
$$\lambda_1 = (0,01288 \pm 0,00047) \frac{1}{s}$$

A felezési idő:

$$T_1 = (53,82 \pm 1,96)s$$



1. ábra. A későneutronok által okozott beütések



2. ábra. A beütésszámok logaritmusa, az utolsó szakaszra illesztett egyenessel

A tengelymetszet a relatív intenzitás logaritmusa: $\ln I_1 = 7,134 \pm 0,138$, azaz a relatív intenzitás:

$$I_1 = 1253 \pm 173$$

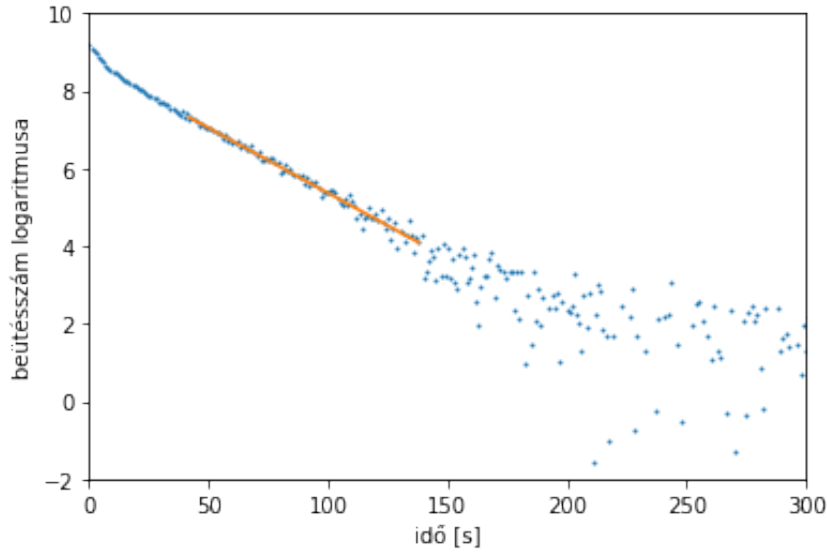
Ezt követően levontuk a leghosszabb felezési időhöz tartozó izotóp intenzitásértékeit az eredeti adatokból. Kiválasztottuk a következő jól láthatóan egy egyenesre illeszkedő pontokat, ezek $42s - 139s$ közé estek. A transzformált mérési pontok a második szakaszra illesztett egyenessel a 3. ábrán látható.

Az illesztett egyenes egyenlete:

$$f_2(x) = (-0,03361 \pm 0,00047)x + (8,735 \pm 0,044)$$

Az egyenes meredekségének abszolút értéke a bomlási állandónak felel meg, azaz:

$$\lambda_2 = (0,03361 \pm 0,00047) \frac{1}{s}$$



3. ábra. A beütésszámok logaritmusa, az második szakaszra illesztett egyenessel

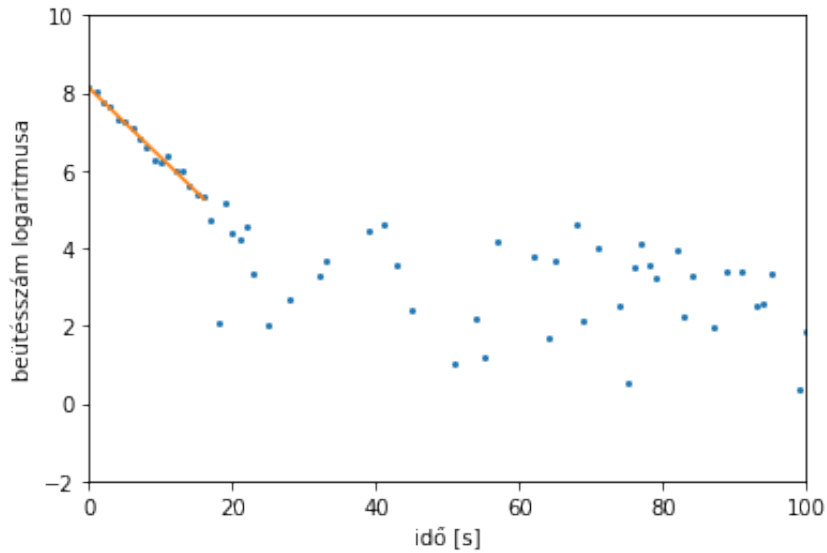
A felezési idő:

$$T_2 = (20,62 \pm 0,29)s$$

A tengelymetszet a relatív intenzitás logaritmusa: $\ln I_2 = 8,735 \pm 0,044$, azaz a relatív intenzitás:

$$I_2 = 6216 \pm 274$$

Az előzőhöz hasonlóan most is levontuk a megfelelő intenzitásértékeket, ezután már csak egy egyenes szakaszt láttunk a mérési pontok között. Ez 0 és 17 s között volt, a 4. ábrán láthatjuk.



4. ábra. A beütésszámok logaritmusa, a rövidebb felezési idejű izotópok által meghatározott egyenessel

Az illesztett egyenes egyenlete:

$$f_3(x) = (-0,1785 \pm 0,0057)x + (8,130 \pm 0,054)$$

Az egyenes meredekségének abszolút értéke a bomlási állandónak felel meg, azaz:

$$\lambda_3 = (0,1785 \pm 0,0057) \frac{1}{s}$$

A felezési idő:

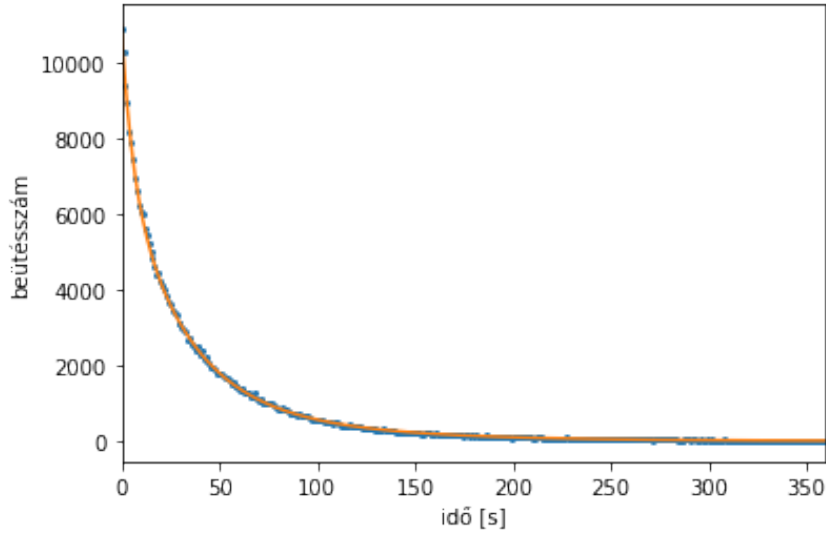
$$T_3 = (3,88 \pm 0,12)s$$

A tengelymetszet a relatív intenzitás logaritmus: $\ln I_3 = 8,130 \pm 0,054$, azaz a relatív intenzitás:

$$I_3 = 3395 \pm 183$$

A paramétereket más függvényalak segítségével is kereshetjük. A késő neutronok időbeli alakulását exponenciális függvények összege jól közelíti. Mivel három csoportot sikerült beazonosítani, ezért az illesztendő függvény:

$$S(t) = \nu_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + \nu_2 \cdot e^{\lambda_2 t} + \nu_3 \cdot e^{\lambda_3 t}$$



5. ábra. A teljes adatsor az illesztett exponenciális függvénnyel

Ebből az illesztésből is megkapjuk a csoportok bomlásállandóját és relatív intenzitását.

A leghosszabb felezési idejű csoportra:

$$I_1 = 1713 \pm 30 \quad \lambda_1 = (0,01437 \pm 0,00009) \frac{1}{s} \quad T_1 = (48,24 \pm 0,30)s$$

A második leghosszabb felezési idejű csoportra:

$$I_2 = 5857 \pm 22 \quad \lambda_2 = (0,03602 \pm 0,00017) \frac{1}{s} \quad T_2 = (19,24 \pm 0,09)s$$

A harmadik csoportra:

$$I_3 = 3426 \pm 12 \quad \lambda_3 = (0,1876 \pm 0,0008) \frac{1}{s} \quad T_3 = (3,69 \pm 0,02)s$$

4.2. A kapott eredmények diszkussziója

A két leghosszabb felezési idejű csoportot mindkét módszerrel be lehetett azonosítani. Az első módszer közelebbi eredményeket adott a 1. táblázatban található irodalmi értékekhez, a leghosszabb felezési idő mérési hibán belül megfelelt annak. A második leghosszabb felezési idő is jól közelítette a vártat, azonban itt az illesztés hibája nem vette figyelembe, hogy már a levonásnál keletkezhetnek pontatlanságok, ez okozhatja az eltérést. A harmadik és negyedik leghosszabb felezési időt nem sikerült elválasztani. Bár a rövidebb felezési idő négy perccel rövidebb, de a részaránya körülbelül kétszerese a másinak. Ezért bár több bomlott el belőle adott ideig, de eleve több volt belőle, így összemosódott a két csoport, felezési időre pedig a két irodalmi érték közötti számot kaptunk. A rövidebb felezési idejű izotópok a mérés kezdetén már releváns mennyiségben nem voltak jelen a mintában.

A második módszer kevésbé volt kedvező. Ahhoz, hogy sikeres legyen az illesztés kezdeti paramétereket kellett megadnunk, azaz az első illesztés (vagy az irodalmi értékek ismerete nélkül) nem, vagy csak a paraméterek becslése után lehetett volna használni. A kapott eredmények pedig kevésbé jól közelítik az irodalmi értékeket. Úgy gondolom ennek az az oka, hogy az egyes csoportokat kevésbé tudjuk ilyenkor szétválasztani. További probléma a módszerrel, hogy irreálisan alacsony hibákat kapunk. Az illesztés lehet ilyen pontos, de a mérés hibájának ezek hihetetlenül kicsik.

4.3. Urántartalom meghatározása

Az elméleti áttekintésben leírtaknak megfelelően összegeztük a standardok, a minta és a háttér esetén a 20-80 s-ban érkezett beütéseket.

$$N_x = 7211; \quad N_{S7} = 9767; \quad N_{S8} = 2626; \quad H_x = 22$$

A különböző standardokból számolt a paraméterek a szórásnégyzetükkel:

$$\begin{aligned} a_1 &= 20847 \frac{1}{mg}; & \sigma_{a1}^2 &= 337443 \frac{1}{mg^2} \\ a_2 &= 22666 \frac{1}{mg}; & \sigma_{a2}^2 &= 545948 \frac{1}{mg^2} \end{aligned}$$

A súlyozott átlaguk:

$$\tilde{a} = 21543 \frac{1}{mg} \quad \sigma_a^2 = 208550$$

Ezt követően már ki tudjuk számolni az ismeretlen uránkoncentrációt:

$$C_x = 0,003163 \quad \sigma_{C_x}^2 = 5.89 \cdot 10^{-9}$$

Azaz a minta uránkoncentrációja:

$$C_x = (0,3163 \pm 0,0077)\text{tömeg}\%$$

5. Összegzés

Virtuális mérésünk során először a későneutron-csoportok átlagos felezési idejét igyekeztünk meghatározni. A leghosszabb felezési időt sikerült is az irodalmi értéknek megfelelően

megtalálni, a következő esetén már nagyobb volt a pontatlanság. A harmadik és negyedik leghosszabb felezési idejű csoport a részarányuk miatt már nem volt elkülöníthető, a kettő közötti felezési időt sikerült csak mérni. A várakozásoknak megfelelően, a logaritmizálás nélküli módszer kevésbé volt eredményes.

A mérés második részében egy ismeretlen minta uránkoncentrációját sikerült meghatározunk két standard segítségével.

Felhasznált irodalom:

Későneutron-paraméterek vizsgálata, uránkoncentráció meghatározása: `oldweb.reak.bme.hu/uploads/media/08_Kesoneutron_parameterek_meghatározasa_01.pdf`