

## 2. mérési gyakorlat:

### Neutronok szerepe a nukleáris energiatermelésben:

#### Bevezetés

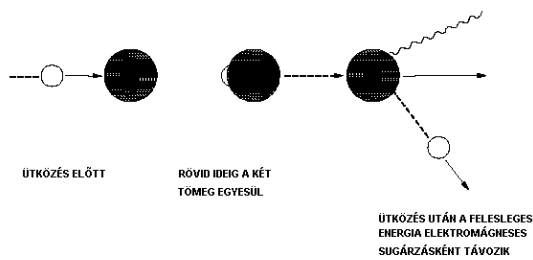
A neutronok nem rendelkeznek töltéssel, közvetlenül nem ionizálnak, és így a szokásos detektálási módszerekkel, amelyek a részecskék ionizáló hatását használják fel közvetlenül nem detektálhatók. Hasonló a helyzet, mint a gammasugarak detektálása esetén: itt is olyan kölcsönhatásokat kell keresnünk, amelyek során töltött, azaz ionizációra képes termékek keletkeznek. Ezzel a "transzformációval" a neutron detektálását visszavezethetjük az ionizáló részek detektálására.

A neutronszámlálás természetesen más problémákat vet fel, ha csak relatív mérésről van szó, mintha az abszolút neutronszám meghatározását is megkívánjuk. Ugyancsak más jellegű feladat a neutronok egyszerű megszámlálása, és az, amikor egyúttal az energiájuk szerinti intenzitásukat (gyakoriságukat) is meg akarjuk határozni. A továbbiakban nagyrészt csak a relatív módszerekkel foglalkozunk.

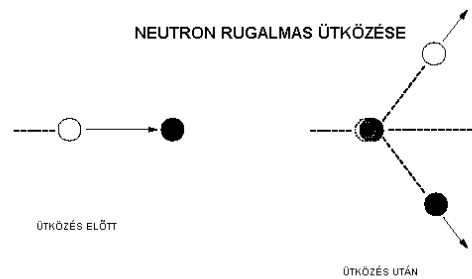
A lehetséges kölcsönhatások, amelyek során a semleges neutront ionizáló részecskévé transzformálhatjuk, a következők:

- a) rugalmas szóródás (visszalökés),
- b) rugalmatlan szóródás
- c) maghasadás (fragmentáció)
- d) magreakció radioaktív termék keletkezésével (neutronok által indukált mesterséges radioaktivitás, indikátormódszer)
- e) magreakció radioaktív termék keletkezése nélkül

A fenti csoportokba osztás gyakorlatilag célravezető, de logikailag nem teljesen korrekt, (pl. a hasadás is egy magreakció, bár speciális)



1. ábra: A neutron rugalmatlan ütközése



2. ábra: A neutron rugalmas ütközése

Ezen kölcsönhatási formák során ionizáló részek keletkeznek és ezek detektálására felhasználhatjuk a megismert detektorok csaknem teljes arzenálját, azaz:

- ionizációs kamrát,
- proporcionális számlálósövet,
- GM-csövet,
- félvezető detektort,
- szcintillációs detektort,
- magemulziót,
- detektorokból álló teleszkóprendszert,
- Wilson-kamrát,
- buborékkamrát,
- szikrakamrát,
- Cserenkov-számlálót
- szilárdtest-nyomdetektort, stb.

Nem mindegyik esetben használhatjuk a fenti detektorok mindegyikét, és az elvileg lehetséges detektorfajták sem egyforma detektálási hatásfokkal rendelkeznek gyakorlati szempontból. A gyakorlatban jól használható detektorokra esetenként rámutatunk.

Az alábbiakban röviden ismertetjük a legfontosabb neutron-detektor típusokat.

### ***Visszalökési (protonszórásos) neutron-detektorok***

A gyors neutronok jellemző kölcsönhatási formáját, a rugalmas ütközési kölcsönhatást alkalmazzák. Ha a gyors neutron valamilyen atommal rugalmasan ütközik, akkor energiájának egy részét átadja a meglökött magnak, amely az energiaátadás következtében ionizálódik. A meglökött (visszalökött) ionizálódott magokat ionizációs hatásuk alapján megszámlálhatjuk a szokásos részecskeszámlálók segítségével. Az atommagok közül a legkönnyebb hidrogén atommaggal a legnagyobb a gyors neutronok rugalmas ütközési valószínűsége. Éppen ezért általában a rugalmas ütközést felhasználó detektorok anyagának nagy hidrogéntartalmú anyagokat (hidrogén gáz, víz, paraffin, műanyagok) szokás választani.

A módszer elsősorban közepes és nagyenergiájú neutronok detektálására alkalmazható; kisebb energiáknál (termikus neutronok) a visszalökött mag energiája ugyanis nehezen mérhető.

A visszalökési detektorok kiviteli formája különféle lehet. Felhasználhatunk erre a célra hidrogénnel töltött ionizációs kamrát, proporcionális csövet, vagy Wilson-kamrát, amikor a töltőgázban keletkezett visszalökési protonok ionizációs jeleit számolja a detektor. Egy másik lehetőség, hogy hidrogéntartalmú szóróanyagot (radiátort) helyeztünk el vékony paraffin-lemez formájában a detektor előtt, vagy a detektor belsejében.

A magemulzió is alkalmas visszalökési detektornak, mivel a zselatin sok hidrogént tartalmaz. Hasonlóképpen felhasználhatók neutrontetektálásra a plasztik-foszforok és folyadék szcintillátorok, magas hidrogéntartalmuk következtében.

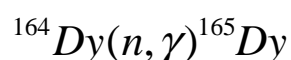
A rugalmas ütközést felhasználó, ún. protonszórásos detektorok közül leggyakrabban a hidrogén gázzal töltött ionizációs kamrát és a szerves szcintillátorokat tartalmazó protonszórásos szcintillációs detektorokat alkalmazzák.

### **Magreakción alapuló neutron-detektorok**

A termikus és gyors neutronok magreakcióba léphetnek a detektor anyagával, melynek során a detektor atomjaival energiát közölnek és azok energiateleslegüktől radioaktív bomlás révén szabadulnak meg. Az esetek többségében a magból kirepülő részecske, például gamma-kvantum viszi el a teljes energia felesleget, vagy annak csak egy részét. Az első esetben a visszamaradt atommag stabil és csak a pillanatszerűen (prompt idő,  $\sim 10^{-12}$  s alatt) kirepülő gamma-kvantum, alfa-részecske stb. ionizációs hatása érzékelhető (magreakció radioaktív termék keletkezése nélkül), a második esetben pedig a prompt részecske csak az energia felesleg egy részét viszi el és a visszamaradt atommag radioaktív, melynek sugárzása, annak ionizációs hatása miatt jól detektálható. Az első kölcsönhatásra jó példa  $^{10}\text{B}$  atommag reakciója:



melynek során a bór atommagból kirepülő alfa-részecske ionizációs hatása érzékelhető. A második kölcsönhatás típusra jó példa a  $^{164}\text{Dy}$  atommag reakciója:



Ebben a reakcióban a magból kirepülő prompt-gamma kvantumok eltávoztása után radioaktív (béta- és gamma-sugárzó) diszpróziom atommagok maradnak vissza, melyek sugárzásának ionizációs hatása révén következtethetünk a neutronok számára. Néhány, a termikus neutronok detektálására alkalmas neutronok által kiváltott detektorban alkalmazott magreakciót foglaltunk össze a következő táblázatban. (1 barn =  $10^{-24}\text{cm}^2$ )

**1. táblázat: Néhány példa neutrontetektálásra alkalmas magreakciókra**

<b>Reakció</b>	<b>Hatáskeresztmetszet (termikus)</b>	<b>Izotóparány</b>	<b>Q (reakcióhő) MeV</b>
$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$	$3900 \pm 110$ barn	18,83%	2,791
$^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{T}$	$910 \pm 100$ barn	7,4	4,785
$^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$	19500 barn	12,3	7,5
$^3\text{He}(n, p)^3\text{T}$	$5060 \pm 200$ barn	$1-10 \times 10^{-5}$	0,7637

A szokásos megoldás szerint, az ionizációs kamrát vagy proporcionális számlálócsövet  $\text{BF}_3$  tartalmú töltőgázzal töltönek meg, vagy - ritkábban - e detektorok belsejét fém B illetve  $\text{B}_4\text{C}$  bevonattal látják el. Szcintillációs módszereket használva, kézenfekvőnek látszik a LiI kristály alkalmazása, amikor is a Li magon végbemenő neutronreakció ionizációs termékei magában a kristályban fényfelvillanást eredményeznek. Egy másik megoldásnál bórsavas észtert kevernek össze ZnS szcintillációs foszforral; ekkor a keletkezett alfa-részek a ZnS-ban szcintillációs fényfelvillanást váltanak ki. Ha valamilyen oldható kadmium vegyületet folyadék-szcintillátorba viszünk, akkor a kadmiumon történő neutronbefogásnál (magreakció!) keletkező gamma-sugarakat a folyadék-szcintillátor detektálja.

Alkalmazható. neutrontetektorként bórvegyülettel átitatott magemulzió is. Érdekességként említjük meg, hogy ha egy szikraszámláló egyik elektródját  $\text{B}_4\text{C}$  bevonattal látjuk el, akkor neutronsámlálásra használhatjuk, mivel a szikraszámláló nagy effektivitással és gyakorlatilag háttérmentesen detektálja a keletkezett alfa-részeket.

A fenti detektorok közül leggyakrabban a  $^{10}\text{B}$  izotópban dúsított  $\text{BF}_3$  gázzal töltött proporcionális csövet (röviden  $\text{BF}_3$ -csövet) vagy újabban a He-töltött proporcionális csövet használják.

A legtöbb magreakción alapuló neutrontetektornál technikai nehézséget jelent az, hogy a gammasugarakra is érzékenyek, ugyanakkor a neutron-sugárzást szinte minden esetben kíséri gammasugárzás. Külön módszereket kell kidolgozni ezen érzékenység csökkentésére.

Ha nem termikus neutronokat akarunk  $\text{BF}_3$  csővel detektálni, akkor a detektort néhányszor 10 cm vastag paraffin-réteggel vonjuk be. Ilyenkor a gyors neutronok lefékeződnek, termalizálódnak és így a kiindulási neutronspektrumtól nagyjából függetlenül csak termikus neutronok jutnak a detektorra. Ezzel a megoldással sikerült a 10 keV - 3 MeV energiatartományban közel egyenletes érzékenységgű neutrontetektort megvalósítani (long counter).

A radioaktív terméket eredményező magreakciókat az ún. aktivációs (aktiválós) detektoroknál, vagy monitoroknál használjuk fel. Ezek a detektorok lényegében az illető target-anyagból készült vékony fóliák (ezüst-, arany-, diszprózium-fólia stb.), melyeket a neutron sugárzás útjába helyeznek el és a sugárzás révén felaktiválódnak. A radioaktívvá vált lemezeket kiemelve és megmérve azok beütésszámát, ebből kiszámolva az aktivitást, az

aktiválás időtörvénye alapján meghatározható az aktiválást végző neutronok idő- és felület-egységre eső száma, fluxusa. Ezeket a monitor lemezeket használják termikus neutron fluxus monitorozására (In, Au, I, Dy, Co, Mn, Na, V, Cl stb.) éppúgy, mint a gyorsneutronok fluxusának meghatározására ( $^{31}\text{P}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{127}\text{I}$  stb.) is. Utóbbi monitorokat küszöbdetektoroknak is nevezik, mivel a gyors neutronokkal végbemenő, radioaktív terméket eredményező magreakció csak bizonyos neutron energia fölött következik be.

Előnyük az egyéb detektor fajtákhoz képest az, hogy a neutronsugárzást kísérő gamma hátér ebben az esetben nem okoz méréstechnikai problémát, mert a radioaktív terméket más helyen, később mérhetjük

### ***Hasadási neutron-detektorok***

Neutron detektálására felhasználhatjuk; a neutronok által kiváltott reakció egy speciális fajtáját, a maghasadást is, amelyet annak ellenére, hogy logikailag tulajdonképpen az előbbi csoportba tartozik, néhány jellegzetessége miatt célszerűnek látszik külön tárgyalni.

A hasadásnál felszabaduló nagy energiának jelentős része (mintegy 160 MeV) a hasadási termékek kinetikus energiájaként jelentkezik. (A periódusos rendszer végén lévő elemek közül termikus neutronok hatására hasad: pl.  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ). Ennek következménye, hogy a hasadási termékek pl. egy ionizációs kamrában igen nagy impulzusokat váltanak ki annál is inkább, mert erősen (sokszor húszszorosan) ionizáltak. Ha tehát egy ionizációs kamrában hasadó anyagot helyezünk el, akkor a kamrára eső neutronok által létrehozott minden egyes hasadási esemény során egy-egy impulzust kapunk, amelyeket a szokásos elektronikus módszerekkel megszámlálva lehetőségünk van a beérkezett neutronok számának meghatározására. Mivel a neutronok kinetikus energiája elhanyagolható a hasadási termékek kinetikus energiájához képest, a kapott impulzus amplitúdója nem függ a neutron energiájától és így ez a módszer sem alkalmas energia meghatározására.

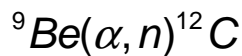
Az előzőekben említett anyagok hasadási hatáskeresztmetszete a termikus tartományban nagy, a nagyobb energiák felé rohamosan csökken. Ha gyorsneutronokat akarunk detektálni, akkor - az előző pontban megismert módszerekhez hasonlóan - vagy paraffinnal termalizáljuk a neutronokat, vagy olyan hasadó anyagokat használunk, amelyeknél a hasadás csak bizonyos neutronenergia fölött megy végbe.

Ilyen pl. az  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ , stb., amelyeknél a hasadáshoz szükséges neutron energia MeV nagyságrendű.

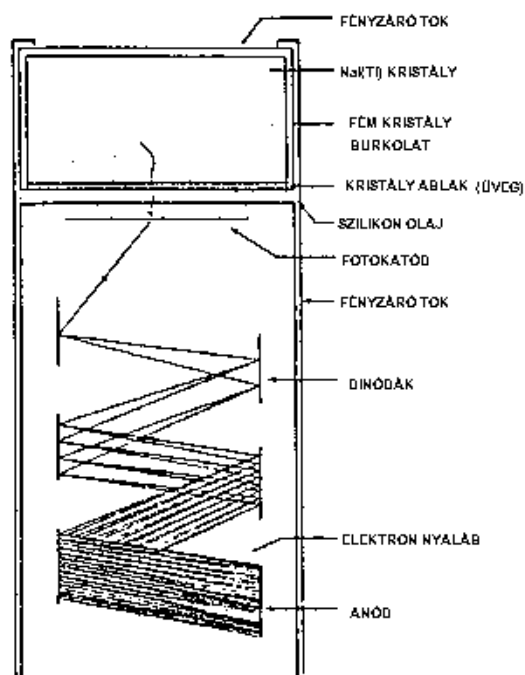
A szokásos gyakorlati kivitelnél a hasadó anyagot vékony réteg formájában (a hasadási termékeknek a rétegből való kijutása érdekében) alumínium, platina, vagy nikkell hordozó lemezre veszik fel, amely egyben nagyfeszültségű elektróda. Az effektivitás növelése céljából gyakran többréteges kamrákat használnak, amelyben hasadó anyagot tartalmazó és az ionok összegyűjtésére szolgáló hűtőelektródák váltakozóan, a légkondenzátor lemezeihez hasonló elrendezésben helyezkednek el.

### Mérési feladat

Mérésünk során laboratóriumi ún. rádium-berillium (Ra-Be) neutronforrásból kilépő gyors neutronok és paraffin tálcák segítségével lelassított termikus neutron relatív számlálását végezzük el szcintillációs típusú neutron-detektorok segítségével. A gyors-neutronokat az  $\alpha, n$  típusú laboratóriumi neutronforrásban állítjuk elő:



A magreakcióhoz az alfa-sugarakat a  $^{226}\text{Ra}$  radioaktív sugárforrás biztosítja. Sajnos a rádium az  $\alpha$ -részecskék mellett nagy-energiájú kísérő  $\gamma$ -sugárzást is kibocsát, mely egyrészt megnöveli a zaj szintet a detektorban, másrészt dozimetriai védelmet, árnyékolást igényel. A neutronforrásból kirepülő gyors neutronok egy részét a sugárnyaláb útjába elhelyezett nagy hidrogén-tartalmú lemezeket (paraffin v. műanyag segítségével lassítjuk le, alakítjuk termikus neutronná. A termikus és gyors neutronok relatív számlálásához két fajta szcintillációs detektort használtunk. Az egyik, a termikus neutronok számlálására alkalmas ZnS (Ag) alapú, bórral kevert műanyagból (poli-metil-metakrilát) készült műanyag kristály, az ún. bór-plasztik szcintillációs detektor, ahol a  $({}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li})$  szerinti magreakció után a termikus neutronok hatására keletkezett  $\alpha$ -részecskéket detektáljuk. A keletkezett  $\alpha$ -részecske a cink-szulfidban fényfelvillanást indukál, mely fényimpulzus az átlátszó kristályból kijutva egy speciális elektroncső, egy fotóelektron-sokszorozó (fotomultiplier) katódjára kerül és elektromos impulzussá alakul, mely megszámlálható.



3. ábra: A szcintillációs detektor

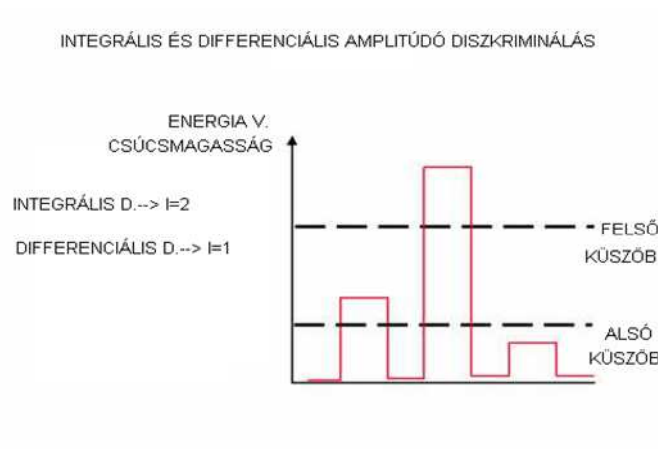
A másik, gyors neutronok számlálására alkalmas szcintillációs detektorban a szcintillátort (ZnS (Ag)) plastikba ágyazva alkalmazzuk, a detektorban a vastag műanyag kristályban lévő nagyszámú hidrogén atom egyikével a gyors neutronok rugalmasan ütköznek és a meglökött gyors proton a cink-szulfid szcintillátorban fényfelvillanást gerjeszt. A fényimpulzus sorsa ezután már ugyanaz, mint a bór-plasztik szcintillációs detektor esetében, fotóelektron-sokszorozó segítségével elektromos (feszültség) impulzussá alakítjuk.

### 1. A számláló munkapontjának meghatározása

A gyakorlat során nagy fajlagos neutron-hozamú  $^{226}\text{Ra}$ -Be neutronforrást használunk. Az előzőekben említett kétféle szcintillációs mérőfej beütésszámát a detektor diszkriminációs küszöb-feszültségétől függően  $\gamma$ -fotonok is befolyásolják. Ezért a neutronforrás  $\gamma$ -sugárzásból származó jelhányadának egy adott érték ( 1% ) alá szorítása érdekében meghatározzuk mind a gyors, mind a termikus neutronok detektálására szolgáló detektor munkapontját, azt a



diszkriminációs feszültséget, ahol a zajként jelentkező kísérő  $\gamma$ -sugárzás beütésszáma nem nagyobb, mint az adott diszkriminációs feszültséghez tartozó neutron-beütésszám 1%-a.

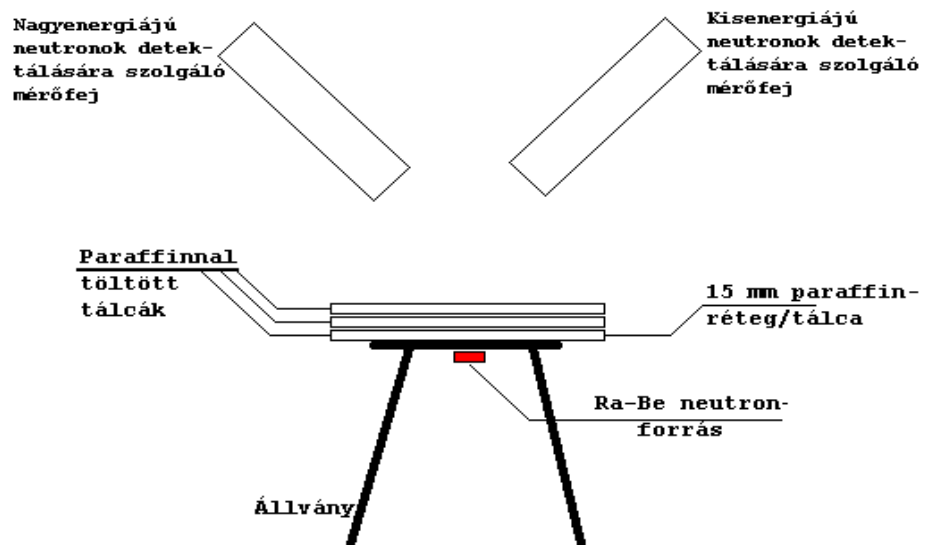


4. ábra: Az integrális és a differenciális amplitúdó diszkriminálás

A munkapontot az integráldiszkriminációs feszültség-mért beütésszám logaritmusának ( $\log(I) - U_{k\ddot{u}sz\ddot{o}b}$ ) diagrammja alapján állapítjuk meg oly módon, hogy meghatároztuk mindkét neutron-energia esetén grafikusán azt a feszültség-küszöb értéket, amelyiknél a meredekebb  $\gamma$ -fotonoktól származó egyenes extrapolált értéke éppen a neutron beütésszám 1%-a. Ezt az ún. kalibrációs mérést, melynek célja a kedvező jel/zaj viszonyhoz tartozó diszkriminációs küszöb-feszültség megkeresése azonos időben végezhetjük el mindkét detektorral, ha a neutronforrásból kirepülő gyors neutronok egy részét műanyag, vagy paraffin tálcák segítségével termikus neutronná lassítjuk le.

Egy tipikus kalibrációs mérés eredményét mutatjuk be a következő táblázatban. A küszöb-feszültségeket 0,5 V feszültségről indítva 0,2 V-os lépésközzel emeljük 3,3 V feszültségig és mindkét detektorral minden egyes feszültségen 2-2 párhuzamos beütésszám mérést végzünk.

A mérés során felhasznált mérési elrendezést az 5. ábrán mutatjuk be:

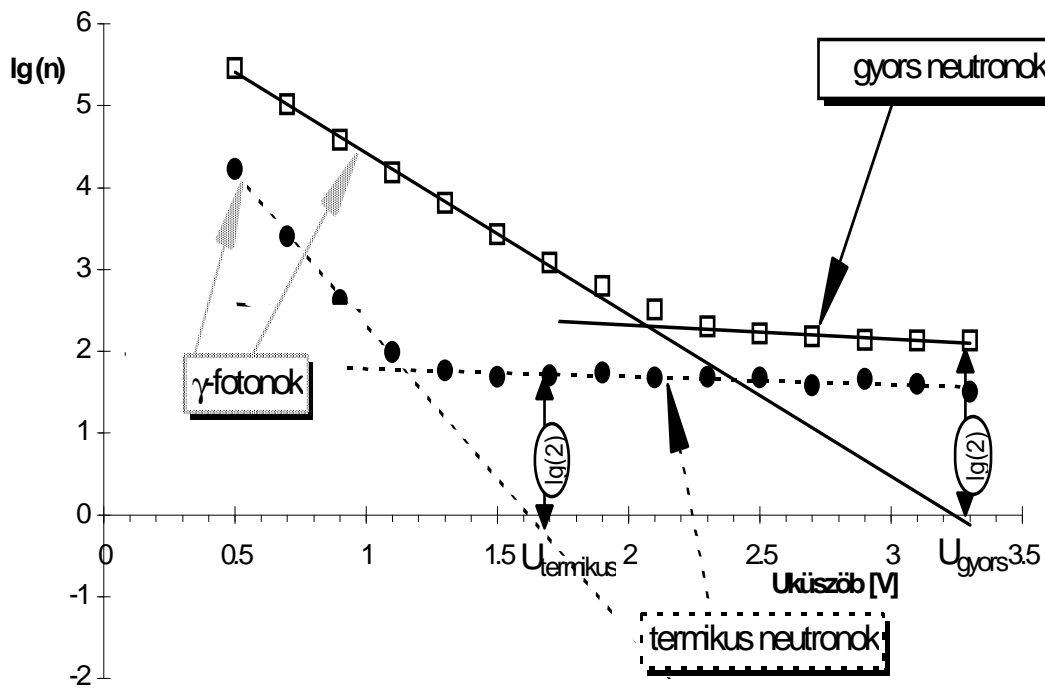


5. ábra: A mérési elrendezés vázlata

A mért adatokat (2. táblázat) az említett léptékben ábrázolva a munkafeszültségeket a 6. ábra szerint határozzuk meg. A minta ábra alapján a munkafeszültségek rendre 1,66 V és 3,3 V a termikus és a gyors-neutron számláló esetén.

2. táblázat: Mért adatok

U [ V ]	termikus neutronok [beütés/40s]				gyors neutronok [beütés/40s]			
	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>átl.</sub>	lg(n <sub>átl.</sub> )	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>átl.</sub>	lg(n <sub>átl.</sub> )
0.5	16798	17454	17 126	4.234	290055	286678	288 367	5.460
0.7	2519	2574	2 547	3.406	103727	103448	103 588	5.015
0.9	413	426	420	2.623	38159	38425	38 292	4.583
1.1	94	104	99	1.996	15492	15299	15 396	4.187
1.3	50	67	59	1.767	6596	6420	6 508	3.813
1.5	49	49	49	1.690	2763	2671	2 717	3.434
1.7	52	49	51	1.703	1197	1213	1 205	3.081
1.9	49	60	55	1.736	638	628	633	2.801
2.1	50	46	48	1.681	371	278	325	2.511
2.3	50	48	49	1.690	198	208	203	2.307
2.5	48	48	48	1.681	166	161	164	2.214
2.7	38	39	39	1.585	136	166	151	2.179
2.9	43	48	46	1.658	147	127	137	2.137
3.1	36	43	40	1.597	125	147	136	2.134
3.3	32	32	32	1.505	137	131	134	2.127



6. ábra: A munkaponti integrális-diszkriminátor szint grafikus meghatározása

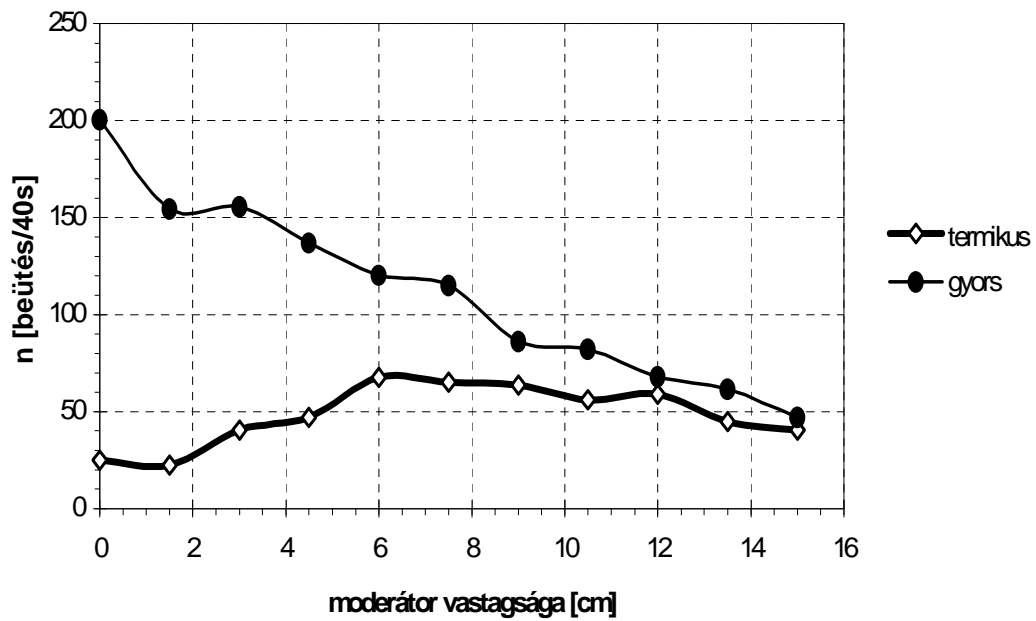
## 2. Moderátor anyag neutron elnyelő tulajdonságainak vizsgálata

A sugárforrás és a detektor közé növekvő rétegvastagságban moderátor-anyagot (egyenként 1.5 cm vastag paraffin-tálcát) teszünk és 2 párhuzamos méréssel mérjük a munkafeszültségekre beállított detektorokkal a moderátor anyag rétegein átjutott termikus és gyors neutronok beütésszámát. Mért adataink a következők lehetnek (3. táblázat):

3. táblázat: Mért adatok

Tálcák száma	Moderátor vastagsága	Termikus neutronok			Gyors neutronok		
		$n_1$	$n_2$	$n_{\text{átl.}}$	$n_1$	$n_2$	$n_{\text{átl.}}$
db	[ cm ]	[beütés/40s ]	[beütés/40s ]	[beütés/40s]	[beütés/40s ]	[beütés/40s ]	[beütés/40s]
0	0.0	29	21	25.0	208	193	200.5
1	1.5	22	23	22.5	149	160	154.5
2	3.0	39	42	40.5	167	144	155.5
3	4.5	46	48	47.0	140	134	137.0
4	6.0	60	75	67.5	127	114	120.5
5	7.5	64	66	65.0	107	123	115.0
6	9.0	65	62	63.5	70	102	86.0
7	10.5	51	61	56.0	81	83	82.0
8	12.0	58	60	59.0	61	75	68.0
9	13.5	50	40	45.0	78	45	61.5
10	15.0	40	41	40.5	44	50	47.0

Végezetül ábrázoljuk a moderátor rétegeken túljutó termikus és gyors neutronok beütésszám átlagát a moderátor vastagság függvényében (7. ábra).



7. ábra: A kis és nagy energiájú neutronok mért beütésszáma a moderátor rétegvastagság függvényében

A mérésekből megállapítható, hogy a termikus neutron-fluxusnak a vastagság függvényében maximuma van, ezért ezt a sugárvédelem kialakításánál figyelembe kell venni.

### Beadandó:

1. A mérés rövid leírása
2. A mérési elrendezés rajza
3. A mérési adatok táblázatosan
4. Grafikonok
5. A mérés értékelése

**Ellenőrző kérdések:**

1. Rajzolja fel a mérésnél alkalmazott mérési elrendezést.
2. Milyen magreakció biztosítja a méréshez szükséges neutronokat?
3. Milyen neutron detektálási lehetőségeket ismer?
4. Milyen lassító anyagot (anyagokat) alkalmazhatunk a neutron-energia csökkentésére?
5. Mi az alapvető különbség az integrális és a differenciális diszkriminátorok működése között?
6. Mi a gyors (nagyenergiájú) neutronok detektálására szolgáló szcintillációs detektor működési elve?
7. Mi a lassú (kisenergiájú) neutronok detektálására szolgáló szcintillációs detektor működési elve?
8. Hogyan küszöböljük ki a mérésnél zavaró jelentős intenzitású nagy energiájú  $\gamma$ -háttér okozta jelet?
9. Mi az oka annak, hogy a lassú neutron mért intenzitása a moderátor rétegvastagságának függvényében maximumon áthaladó görbe szerint változik?
10. Mi az oka a gyors (nagyenergiájú) neutronok monoton intenzitás csökkenésének a moderátor rétegvastagság függvényében?