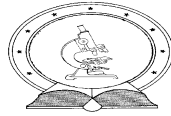


DE TTK



1949

**A NEUTRONREFLEXIÓ FELHASZNÁLÁSA TILTOTT
ANYAGOK KIMUTATÁSÁRA**

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Papp Attila

Témavezető: Dr. Csikai Gyula

DEBRECENI EGYETEM

Természettudományi Doktori Tanács

Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

Debrecen, 2016.

Készült

A Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolája
Fizikai módszerek interdiszciplináris kutatásokban programja keretében
a Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézetében.

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori Tanács Fizikai Tudományok Doktori Iskolája Fizikai módszerek interdiszciplináris kutatásokban programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 2016. szeptember 7.

Papp Attila
jelölt

Tanúsítom, hogy Papp Attila doktorjelölt 2010-2013 között a fent megnevezett Doktori Iskola Fizikai módszerek interdiszciplináris kutatásokban programjának keretében irányítással végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2016. szeptember 7.

Dr. Csikai Gyula
témavezető

A NEUTRONREFLEXIÓ FELHASZNÁLÁSA TILTOTT ANYAGOK KIMUTATÁSÁRA

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében
Fizika tudományágban

Írta: Papp Attila okleveles fizikus, fizika-földrajz-matematika tanár

Készült a Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolája
Fizikai módszerek interdiszciplináris kutatásokban programja keretében

Témavezető: Dr. Csikai Gyula

A doktori szigorlati bizottság:

Elnök: Dr.
Tagok: Dr.
Dr.

A doktori szigorlat időpontja: 2015. május 12.

Az értekezés bírálói:

Dr.
Dr.

A bírálóbizottság:

Elnök: Dr.
Tagok: Dr.
Dr.
Dr.
Dr.

Az értekezés védésének időpontja:

Tartalomjegyzék:

1. BEVEZETÉS	1
2. IRODALMI HÁTTÉR	2
2.1. A neutronok lehetséges atommag reakciói.....	2
2.2. A neutronok detektálási módszerei	11
2.3. A neutronokon alapuló vizsgálati módszerek	19
2.3.1. Neutron aktivációs analízis.....	19
2.3.2. Neutron-reflexiós eljárás	21
2.4. A dolgozat témájához kapcsolódó korábbi debreceni vizsgálatok.....	23
2.5. Tiltott anyagok kimutatásához kapcsolódó nemzetközi kutatások.....	30
3. MÉRÉSI MÓDSZEREK ÉS EREDMÉNYEK	33
3.1. Mérések az ETNA mérési összeállítással.....	33
3.2. Összehasonlító mérések reflexiós és aktivációs módszerrel.....	40
3.3. A BITATRON mérési összeállítással végzett további vizsgálatok	51
4. ÖSSZEFOGLALÁS	64
5. SUMMARY	69
6. IRODALOMJEGYZÉK	74

Köszönetnyilvánítás:

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Csikai Gyulának a dolgozat elkészítéséhez szükséges kísérletek elvégzése során nyújtott szakmai segítségéért és a dolgozat megírásához adott tanácsaiért.

Köszönetet mondok mindazoknak (a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizika Intézetének, ill. a Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézetének munkatársai), akik segítségemre voltak a dolgozat létrehozása során.

1. Bevezetés

Amióta Chadwick 1932-ben felfedezte a neutronokat, a neutronfizika fontos szerepet játszik az atommagfizikai kutatásokban és a nukleáris technológiában. Ennek két fő oka van. Az első az, hogy a neutronok tulajdonságai a többi részecske jellemzőitől igen eltérőek (pl. elektromosan semlegesek, de mágneses momentumuk van, nagy energiatarományban előállíthatók), amely tényt a kísérletek során jól fel lehet használni. A második ok pedig az, hogy neutronsugárzást viszonylag könnyen elő tudunk állítani pl. kisgyorsítókkal a (d,n), radioaktív forrásokkal az (α ,n) reakciókkal vagy a spontán hasadó ^{252}Cf izotóp segítségével. Mindezen okok miatt a neutronfizika módszereit és eredményeit fel tudjuk használni a kémiai analitikában [1].

A dolgozatban be szeretném mutatni a neutronok jellemzőit, ill. a velük kapcsolatos magreakciókat, detektálási- és vizsgálati módszereket, különös tekintettel a neutron-reflexió és az aktivációs módszer témakörére. Ismertetem az általunk használt módszereket (a neutron-reflexión, ill. az aktiváción alapulót) és a segítségükkel kapott eredményeket, amelyeket a kémiai analízis során felhasználtunk. Összehasonlításra kerülnek a különböző módszerek, ill. a velük kapott eredmények [2].

A méréseink célja az volt, hogy egy nagy térfogatú anyagmintában elrejtett szerves anyagokat (pl. robbanóanyagokat és kábítószereket) ki tudjunk mutatni neutronfizikai módszerek felhasználásával. Ez különösen fontos, mivel még ma is problémákat okoznak a háborúk után a talajban maradt taposóaknák (több mint 60 országban, legalább 60 millió db), ill. a drogsempészéssel kapcsolatos bűncselekményeket is megemlíthetjük (a mexikói drogháborúban 2006 óta, több mint 150 ezer ember halt meg vagy tűnt el) [3]. Ráadásul a kimutatandó illegális anyagok manapság már igen kis mennyiségben tartalmaznak fémeket, ezért a hagyományosan használt elektromágnesességen alapuló fémdetektorok egyre kevésbé használhatók. A szerves anyagok hidrogén tartalma azonban könnyen vizsgálható neutronok segítségével így pl. a plasztik robbanóanyagok is. A nagy térfogatú, nagy tömegű minták hidrogén (és így szerves anyag) tartalmának a meghatározására már régen folynak kísérletek nemzetközi együttműködésekben, pl. a NAÜ irányításával is, amelyekben debreceni kutatók is aktívan részt vettek [1,4,5].

2. Irodalmi háttér

2.1. A neutronok lehetséges atommag reakciói

Az atommagok kétféle alkotórészből épülnek fel: a pozitív töltésű protonokból és az elektromosan semleges neutronokból. (A két részecske tömegének az eltérése kisebb, mint egy százalék, amely tény a kísérletek során ki lehet használni.) Az atommagokban a neutronok kötött állapotban vannak, de a szabad neutronok nem stabilak: az életidejük ~15perc, de ez az érték a környezettől is függ. A szabad neutronok pedig β^- bomlást szenvednek ~10perc felezési idővel [6,7].

A nukleonok között fellépő erőnek kicsi a hatótávolsága (10^{-12} cm), ezért a kis energiájú neutronok is képesek áthatolni nagy rétegvastagságokon, anélkül hogy kölcsönhatásban vennének részt. Így tetszőlegesen kis mozgási energia esetén is képesek az atommagok közelébe jutni és velük kölcsönhatásba kerülni. A fizikai szempontból érdekes energiatartomány emiatt zérustól kezdődik és a neutronfizikai jelenségek sokfélesége ezzel a körülménnyel magyarázható. Olyan energiaintervallumokat szoktak megadni, amelyekben belül a részecskék által kiváltott reakciók jellemzői, a neutronok előállításának és észlelésének módszerei megegyeznek. A szakirodalomban általában a neutronok mozgási energiáját (E), a részecskék sebességét, a hozzájuk tartozó de Broglie-féle hullámhosszat ($\lambda=h/p=[h^2/2mE]^{1/2}$) és az ekvivalens hőmérsékletet ($E=kT_{\text{ekv}}$) szokták megadni. A neutronok energia szerinti osztályozását mutatja be a 2.1.1. táblázat [6,8,9].

2.1.1. táblázat: A neutronok osztályozása [9]

Osztályozás	E (eV)	v (m/s)	λ (m)	T_{ekv} (K)
Hideg neutronok	0,001	437	$9,04 \cdot 10^{-10}$	11,6
Termikus neutronok	0,025	2190	$1,81 \cdot 10^{-10}$	290
Epitermikus neutronok	1	$1,38 \cdot 10^4$	$2,86 \cdot 10^{-11}$	$1,16 \cdot 10^4$
Rezonancia neutronok	10^2	$1,38 \cdot 10^5$	$2,86 \cdot 10^{-12}$	$1,16 \cdot 10^6$
Intermedier neutronok	10^4	$1,38 \cdot 10^6$	$2,86 \cdot 10^{-13}$	$1,16 \cdot 10^8$
Gyors neutronok	10^6	$1,38 \cdot 10^7$	$2,86 \cdot 10^{-14}$	$1,16 \cdot 10^{10}$
Nagyonyors neutronok	10^8	$1,28 \cdot 10^8$	$2,79 \cdot 10^{-15}$	$1,16 \cdot 10^{12}$
Ultragyors neutronok	10^{10}	$2,99 \cdot 10^8$	$1,14 \cdot 10^{-16}$	$1,16 \cdot 10^{14}$

A magreakciók vizsgálatánál fontos megadni a reakcióhoz tartozó hozamot és hatáskeresztmetszetet. Ha a céltárgyra eső bombázó részecskék másodpercenkénti száma N_0 , a létrejövő reakciók száma N és

a céltárgy-vastagság (d) kicsi a bombázó részecskék hatótávolságához viszonyítva, akkor a hozam [7]:

$$Y \equiv N/N_0 \quad (2.1.1.)$$

Az effektív hatáskeresztmetszet pedig (ha n_s a céltárgy felületegységre eső atommagjainak a száma) [7]:

$$\sigma \equiv N/(N_0 n_s) \quad (2.1.2.)$$

Kísérleti tapasztalatok szerint a hatáskeresztmetszet nagyságrendekkel is eltérhet a céltárgy atommagjainak geometriai keresztmetszetétől. (A σ felfogható úgy is, mint a magreakció létrejöttének valószínűségét megadó geometriai valószínűség.) [7]

A magfizikai kísérletek során a differenciális hatáskeresztmetszetet is meghatározzák. A $d\sigma/d\Omega$ differenciális hatáskeresztmetszet azoknak a részecskéknek szögeloszlását adja meg, amelyek a reakció következtében a céltárgyról távoztak. Ha $d\Omega$ -val a detektálás szempontjából hatékony térszöveget jelöljük, Θ -val pedig a nyaláb irányához viszonyított detektálási szöveget, akkor a differenciális hatáskeresztmetszet [6,7]:

$$\sigma(\Theta) = (d\sigma/d\Omega)_\Theta \quad (2.1.3.)$$

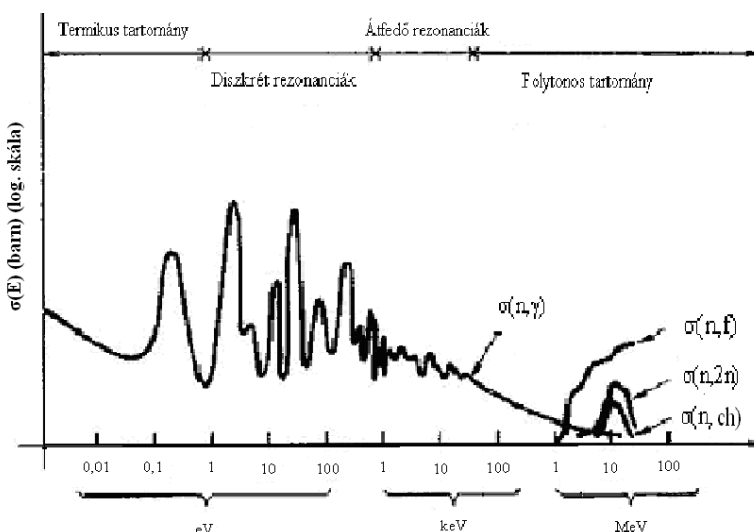
Kapcsolat van a magreakciók száma és a kiterjedt céltárgy jellemzői között is. Amennyiben a céltárgy n számú részecskét tartalmaz cm^3 -ként és d vastagsága olyan kicsi, hogy a céltárgy atommagjaihoz tartozó hatáskeresztmetszetek nem fedik át egymást, akkor a σ értékei additívak lesznek és megadják a céltárgyra vonatkozó teljes hatáskeresztmetszetet. (Más szavakkal: ha a valószínűségi mezőben az eseménytér részhalmazai diszjunktak, akkor a valószínűségek additívak lesznek.) Ekkor [6]:

$$N = N_0 \sigma d n \quad (2.1.4.)$$

ahol N_0 a bombázó részecskék száma és σ a céltárgy magok hatáskeresztmetszete. Vastag céltárgy esetén (vagyis abban az esetben, ha a hatáskeresztmetszetek átfedik egymást), akkor 2.1.4.-es képlettől eltérő módon adhatjuk meg N és σ kapcsolatát [6]:

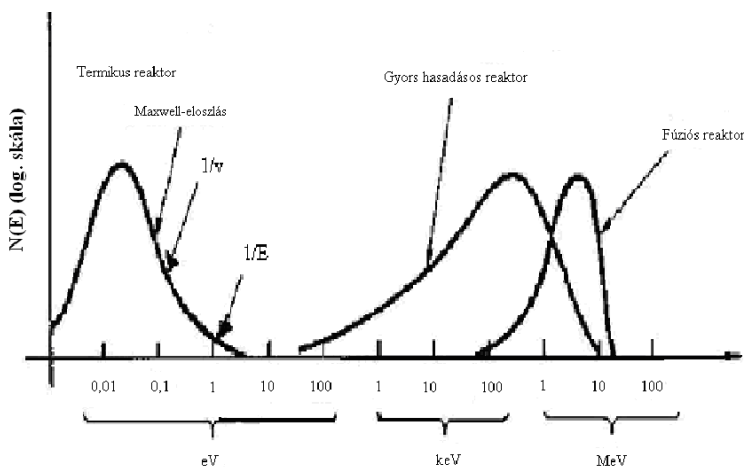
$$N = N_0 [1 - \exp(-n\sigma d)] \quad (2.1.5.)$$

Mivelhogy a bombázó részecskék energiájától függ az effektív hatáskeresztmetszet, ezért a σ értékét részecskeenergiák egész sorozatánál megméri, vagyis felveszik az adott magreakció ún. gerjesztési függvényét. Ezt a függvényt későbbi kísérletek során fel tudják használni arra, hogy kiválasszák az olyan energiájú bombázó részecskéket, amelyek felhasználásával a reakció nagy valószínűséggel létrejön [7].

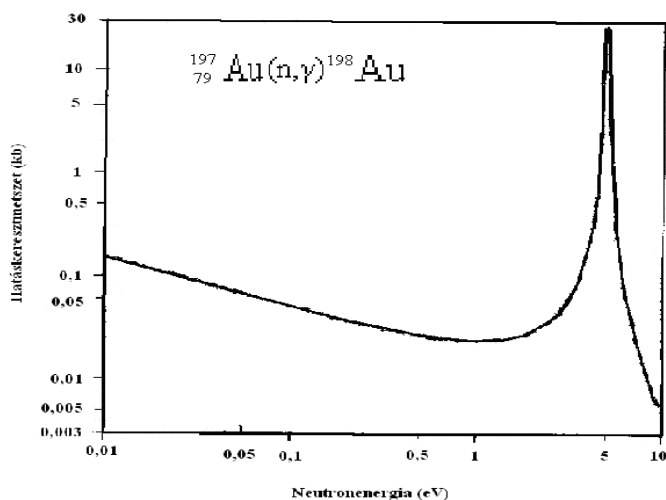


2.1.1. ábra: A neutron indukált magreakciók hatáskeresztmetszetének változása a neutronenergia függvényében [10]

Egy reakciót jellemezhetünk a reakcióenergia (Q) értékével is. Ezt a reakcióban részt vevő magok reakció előtti és utáni tömegeinek (energiáinak) különbsége határozza meg. Exoterm reakciók esetén a felszabaduló energia a keletkezett reakciótermékek mozgási-, ill. gerjesztési energiája formájában nyilvánul meg. Endoterm reakciók esetén viszont a reakcióhoz szükséges energiát a bombázó részecskének kell a rendszerbe hoznia. Küszöbenergiának nevezzük a bombázó részecskének azt a mozgási energiáját, amely minimálisan szükséges a reakció végbemeneteléhez. A küszöbenergia a reakcióhoz rendelt Q értéknél mindig nagyobb, hiszen a lendület-megmaradás miatt a két részecske együttes impulzusa akkora lesz, mint amekkora a bombázó részecske impulzusa volt. Ha a céltárgy atommagjai nagyon nehezek, akkor a küszöbenergia a Q értékhez is közelíthet. Endoterm reakciók esetén a reakció hatáskeresztmetszete a küszöbenergia alatt zérus, viszont a küszöbenergia elérése után nagymértékben megnő. Példaként az $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ reakció gerjesztési függvénye látható a 2.1.3.-as ábrán [6,7].



2.1.2. ábra: Tipikus neutron spektrumok [10]



2.1.3. ábra: Az $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ reakció gerjesztési függvénye az 5eV körüli rezonanciával [11]

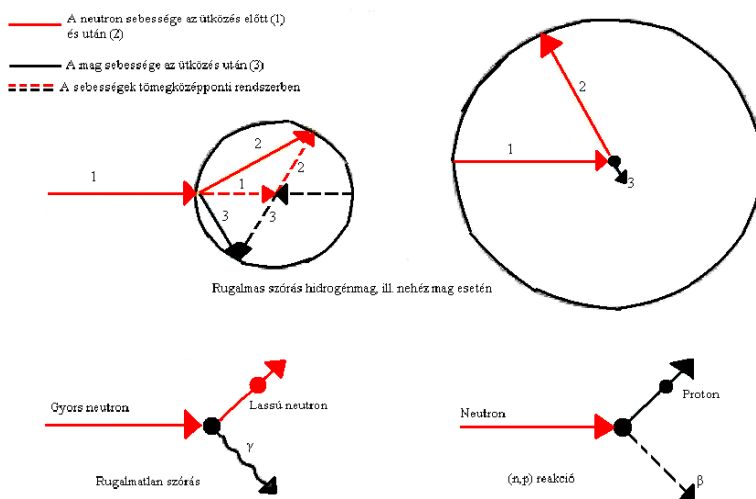
A gyors neutronok anyaggal történő totális kölcsönhatását (σ_T) két alapvető folyamat határozza meg: az elasztikus (σ_{EL}) és a non-elasztikus (σ_{NE}) hatáskeresztmetszetek értékei. Ez utóbbi részét képezik a részecskéket termelő magreakciók is (pl. az (n,α) reakció). Ezeket a reakciókat mutatja be (vázlatosan) a 2.1.4.-es ábra [6].

Rugalmas szórással (n,n) járó ütközés esetén a neutronok és az anyag atommagjai közötti ütközések során fellépő energiavesztés függ a szóró atommagok tömegétől, a következő képlet alapján [9]:

$$E = E_n(4m_nA)(A+m_n)^{-2}\cos^2\varphi = E_n\alpha\cos^2\varphi \quad (2.1.6.)$$

ahol m_n , ill. E_n a neutron tömege, ill. energiája és E a meglökött mag energiája. Az E értékét az $\alpha = (4m_nA)(A+m_n)^{-2}$ együttható befolyásolja, így ez az azonos tömegű partnerek esetén a legnagyobb (vagyis egy proton és egy neutron ütközésénél $E_p = E_n\cos^2\varphi$). Ebből az is következik, hogy a szórási hatáskeresztmetszet a hidrogén esetén a legnagyobb, amelynél $\sim 15\text{MeV}$ energiáig a következő képlettel jól megadható a $\sigma_{EL}(E_n)$ függvény [9]:

$$\sigma_{EL}(E_n) = 3,9[(1,22 - 0,06E_n)^2 + 0,5E_n]^{-1} + 1,3[(0,27 + 0,06E_n)^2 + 0,5E_n]^{-1} \quad (2.1.7.)$$



2.1.4. ábra: A neutronokkal kiváltott magreakciók vázlata [6, módosítva]

Könnyű magokkal (pl. a hidrogén atommagjával) ütközve a részecske tetszőleges nagyságú energiát, akár a bombázó neutron teljes energiáját is átveheti. Ezen ok miatt, neutronsugárzás elleni védelem kiépítésekor, ill. ha neutronlassításra van szükség, jól használhatók a nagy hidrogéntartalmú anyagok (mint például a víz, polietilén vagy bonamid: $C_6H_{11}ON$). A rugalmas szórást gyakran használják gyors neutronok kimutatására is, lásd pl. a proporcionális számlálót vagy a folyadék és plasztik szcintillátorokat [6,7].

Rugalmatlan szóródáskor a céltárgy atommagja energiát vesz fel a bombázó részecskétől és gerjesztett állapotba kerül, de a gerjesztési energiát le is adja, főleg gamma-sugárzás formájában. Rugalmatlan ütközésnél fellépő reakciók: (n,x) , ahol pl. $x = n, 2n, p, {}^2\text{H}, \alpha, {}^3\text{He}, {}^3\text{H}, \gamma$

lehetnek. Megjegyzés: a rugalmatlan szórásen alapuló reakció csak egy adott küszöbenergia felett jelentkezik. Ekkor a hatáskeresztmetszet $\sigma(n,n') \sim (E_n - E^*)^{1/2}$, ahol E_n a neutron kinetikus, E^* pedig a céltárgy-mag gerjesztési energiája [6,7].

Az (n,p) és (n,α) reakciók adatai a legteljesebbek a küszöb és 15MeV közötti energiatartományban. Ezek a folyamatok endotermek és hatáskeresztmetszetükre felírható a $\sigma(n,p)$ vagy $\sigma(n,\alpha) \sim T(E_n - E^*)^{1/2}$ arányosság, ahol T az alagúteffektus transzmissziós együtthatója. Ezek a folyamatok is alkalmasak neutronok detektálásra pl. BF_3 számlálóokban [7].

A neutronokkal kapcsolatos magreakciók esetén az (n,γ) reakciók a legfontosabbak a gyakorlati alkalmazások szempontjából. Kis neutronenergiák és nehéz céltárgy-magok esetén a legvalószínűbb folyamat a neutronbefogás. Az (n,γ) reakciók hatáskeresztmetszetei akár ezer barn értéket is felvehetnek, ami jóval nagyobb a geometriai keresztmetszetenél. A Fermi által felismert törvény szerint az (n,γ) folyamatok hatáskeresztmetszete kis energiáknál fordítottan arányos a neutronok sebességével: $\sigma_T(n,\gamma) \sim \sigma_0 v_n^{-1}$, míg az energia növelésével a $\sigma_{\text{Epi}}(n,\gamma) \sim \sigma_0 E_n^{-1}$ függvénnyel közelíthető (lásd a 2.1.2. ábrát). A hatáskeresztmetszet energiafüggésének másik megfigyelhető jellemzője, hogy az $\sim 1\text{eV}-0,5\text{MeV}$ energiatartományban éles és átfedő rezonancia csúcsokat figyelhetünk meg, amelyek helye erősen függ a céltárgy atommagjának tulajdonságától. Az izolált rezonanciaállapotok hatáskeresztmetszetét a Breit-Wigner formula alapján határozhatjuk meg:

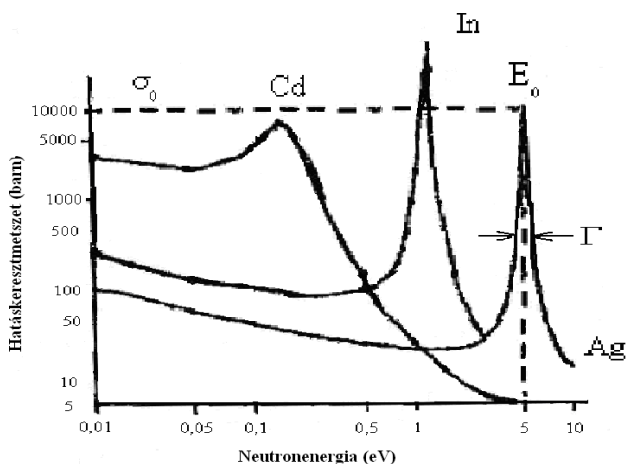
$$\sigma(E) = \sigma_0 (E_0/E)^{1/2} (1 + \{ \{E_0 - E\} / \{\Gamma/2\} \}^2)^{-1} \quad (2.1.8.)$$

ahol E_0 a $\sigma(E)$ függvény maximuma, Γ pedig a rezonancia csúcs félértékszélessége (lásd a 2.1.5. ábrát). (Megjegyzés: az E_0 értéke ezüst, arany és indium esetén 5,1eV, 4,9eV, ill. 1,4eV.) A rezonanciákhoz tartozó, ún. rezonancia integrálok (I_0) értékeit pedig táblázatokban találhatjuk meg [12], de ki is számolhatjuk a $\sigma(E)/E$ függvény integrálásával az ún. kadmium levágási értéktől (Cd cut-off energy) $\sim 0,5\text{eV}$ -tól a végtelenig véve az intervallumot. A σ_T , az I_0 és a Φ fluxusok ismeretében a reakciósebesség is megadható:

$$R = \Phi \sigma = \Phi_T \sigma_T + \Phi_{\text{Epi}} I_0 \quad (2.1.9.)$$

ahol Φ_T , ill. Φ_{Epi} a termikus, ill. epitermikus neutronokra vonatkozó fluxus. A gyakorlatban leggyakrabban az (n,γ) reakciókat használják radioaktív izotópok előállítására, amelyeket a kémiai analitikában, az

iparban, a mezőgazdaságban és az orvosi diagnosztikában egyaránt használnak, továbbá hasadóanyagok előállítására is [7].



2.1.5. ábra: A rezonanciacsúcsok az Ag és az In gerjesztési függvényeiben, valamint a Cd cut-off energia helyzete [11]

A gyors neutronokhoz kapcsolódó magreakciók csak egy adott nagyságú küszöbenergia (E_{\min}) felett mennek végbe. (Ezeket foglalja össze a [13] táblázat.) Ezekre a reakciókra vonatkozó hatáskeresztmetszet a küszöbenergia felett lényegesen megnő, majd egy adott energiaérték elérése után közel állandó marad, amíg az energia el nem ér egy újabb magreakcióhoz szükséges küszöbenergiát. Ezt jól demonstrálja pl. a $^{238}\text{U}(n,f)$ gerjesztési függvénye [6].

A teljes hatáskeresztmetszetet a $\sigma_T = \sigma_{NE} + \sigma_{EL}$ összefüggés adja meg, ahol σ_{NE} , ill. σ_{EL} a neutron rugalmatlan, ill. rugalmas szórás hatáskeresztmetszete. A rugalmatlan szórás olyan energiákon megy végbe, amikor a neutron az atommaggal egy gerjesztett közbenső magot hozhat létre. Ezekon az energiákon vannak a reakcióhoz tartozó rezonanciacsúcsok. A könnyű magoknak kisszámú, egymástól távol lévő rezonanciahelye van, de ezeket gyakran nem lehet szétválasztani a hatáskeresztmetszet mérésénél [6].

A fél-klasszikus optikai modell alkalmazásával Angeli és munkatársai [14] sikeresen értelmezték az integrális- és differenciális rugalmas és rugalmatlan szórás hatáskeresztmetszetek tömegszám és energia függését, főleg a $\sim 14\text{MeV}$ körüli energiatartományban, ahol megfelelő számú pontos adat áll rendelkezésre. Ez az egyszerű modell jó becslést ad a fenti hatáskeresztmetszetekre a $0,5\text{-}40\text{MeV}$ energiatartományban

[15,16]. Az összefüggéseket a 14MeV körüli energiáknál a 2.1.2. táblázat tartalmazza [14,17]. Az összefüggésekben szereplő r_0 magrádiusz paraméter finomszerkezetét Angeli [15] részletesen tisztázta. Megjegyzés: az (n,p), (n,2n), (n, α) és az (n, ^3H) reakciók hatáskeresztmetszetében erős aszimmetria paraméter, $(N-Z)/A$, függést figyeltek meg [17]. A 14 MeV energiájú neutronokkal létrehozható legfontosabb reakciókat mutatja be a 2.1.3. táblázat [10].

2.1.2. táblázat: A $\sigma(E)$ függvény közelítése a különböző neutronenergiáknál [14,17]

Neutronenergia	$\sigma(E)$
Hideg+Termikus	$1/v$
Epitermikus	$1/E$
Gyors	$\sigma_{\text{BN}}=2\pi(r_0A^{1/3}+\lambda)^2 \approx \sigma_{\text{EL}}+\sigma_{\text{NE}}$ $\sigma_{\text{EL}}=0,5\sigma_{\text{BN}}[1,03-0,208\cos(2,18A^{1/3}-1,25)]$ $\sigma_{\text{NE}}=0,505\sigma_{\text{BN}}$

2.1.3. táblázat: A 14 MeV energiájú neutronokkal létrehozható magreakciók [10]

	N-2	N-1	N	N+1
Z	(n,3n)	(n,2n)	Eredeti mag (n,n' γ) (n,n)	(n, γ)
Z-1	(n,nt) (n,tn)	(n,t) (n,nd) (n,dn)	(n,d) (n,np) (n,pn)	(n,p)
Z-2	(n, α) (n,n α) (n,n)	(n, α) (n, ^3He n) (n,n ^3He)	(n, ^3He) (n,pd) (n,dp)	(n,2p)

(n,f) (n,nf) (n,2nf)

A lassú neutronokat általában maghasadásból vagy magreakciókból származó gyors neutronok (hidrogéntartalmú közegben történő) lelassításával állítják elő és azért hasznosíthatók jól, mert nagy a hatáskeresztmetszetük különösen az (n, γ) és az (n,f) magreakciók esetén. Az epitermikus neutronok energiatartományában az atommagokra vonatkozó hatáskeresztmetszeteket különálló, egymástól jól megkülönböztethető rezonanciák adják meg, így a hatáskeresztmetszetben

nagy eltérések tapasztalhatók az energia- és a célmag rendszámának megváltozásával. Ebben az energiatartományban a hatáskeresztmetszet jól közelíthető a $\sigma(E)=\sigma(E_n)/E$ függvénnyel (lásd a Breit-Wigner formulát). Az epitermikus neutronok rezonanciájának a vizsgálata így egy fontos eszköz a magfizikai kutatásokban [6,8].

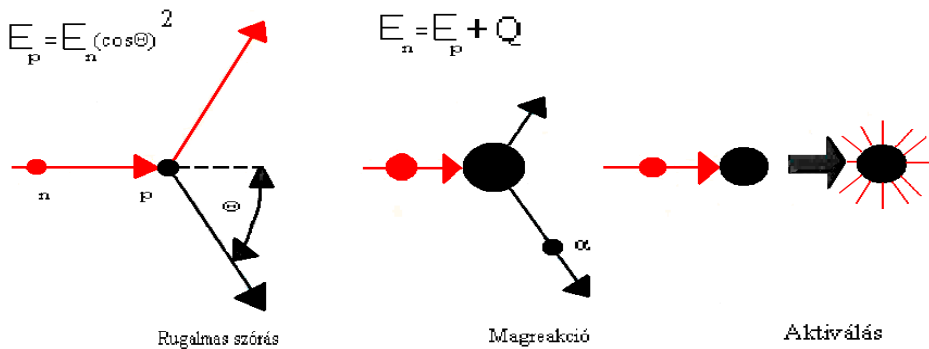
A termikus neutronenergiáknál a részecskék sebességeloszlása azt mutatja, hogy a neutronok a környezetükben lévő molekulákkal és atomokkal egyensúlyban vannak. Az anyagban a neutronok egy gázhoz hasonlóan mozognak, a sebességük a Maxwell-Boltzmann eloszlást követi, azaz a vizsgált közegegen belüli eloszlásukra olyan diffúziós összefüggéseket lehet felírni, mint amilyenekkel pl. egy gáz levegőben való szétterjedését jellemezzük. A kismértékben neutronelnyelő közegekben (pl. nehézvízben, D_2O), az élettartamuk nagyon hosszú lehet. A termikus neutronok fontos szerepet játszanak a reaktorfizikában (a nagy hasadási hatáskeresztmetszetük miatt), ezért jelentős a vizsgálatuk [6,7,8].

A hideg (vagy más néven szubtermikus) neutronok alatt olyan neutronokat értünk, amelyek kinetikus energiája a termikus neutronokénál is kisebb, esetleg $\sim 0,001\text{eV}$ nagyságrendjébe esik. A hideg és a termikus neutronoknak az anyagokkal való kölcsönhatása során fellépő jelenségeket a neutronok hullámtulajdonsága, az anyag kémiai összetétele és kristályszerkezete döntően befolyásolja. Azért is fontos megadni a neutronenergiákhoz tartozó de Broglie hullámhosszat, mert a Bragg-féle összefüggés segítségével a kristályok neutron-diffrakciós módszerrel tanulmányozhatók alkalmas energiájú neutronok esetén [6,8].

(Megjegyzés: a különböző energiával rendelkező neutronok legfontosabb tudományos és gyakorlati alkalmazásai megtalálhatók pl. a [7,8,10,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27] kiadványokban.)

2.2. A neutronok detektálási módszerei

A neutronok detektálása az általuk valamilyen magreakcióban kiváltott töltött részecskék segítségével történik, amelyek létrehozásánál három fontos folyamat játszódhat le: 1. Rugalmas szórás könnyű atommagokon, amely során a mag elegendő energiát vesz fel ahhoz, hogy őt magát, mint töltött részecskét ki lehessen mutatni (ütközéses vagy meglökéses számláló). Az energiaátadás akkor a legnagyobb mértékű, ha a neutron és a szóró részecske tömege közelítőleg azonos, ezért a neutron-proton ütközések jól használhatók. 2. Neutronok által kiváltott magreakciók, amelyek során protonok, neutronok vagy α -részecskék keletkeznek, illetve neutronok által indukált maghasadások mennek végbe. 3. Olyan magreakciók, amelyek során radioaktív izotópok jönnek létre, ekkor a keletkezett izotópok aktivitása a mintába belépő neutronok fluxusával arányos (lásd: 2.2.1. ábra) [6,7,8].



2.2.1. ábra: A neutronok kimutatására alkalmas kölcsönhatások [6, módosítva]

A neutrondetektálási módszerek leírásánál és a detektorok jellemzésénél az érzékenységet, a detektálási hatásfokot, az energiafelbontást és a konverziós hatásfokot szokták megadni. A detektor S érzékenységét az egységnyi neutronfluxus hatására időegységenként keletkező n impulzusszámmal jellemezzük, az η detektálási hatásfokon pedig egy adott neutron detektálásának valószínűségét értjük [8]:

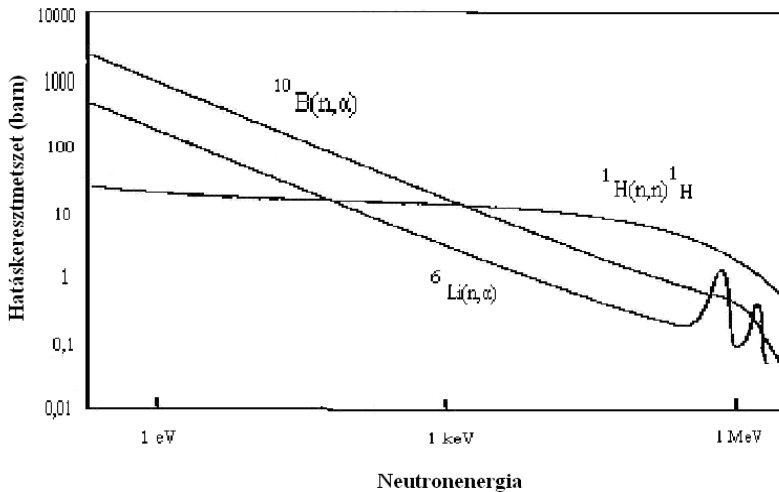
$$S = \eta/\Phi, \text{ ill. } S = \eta F \quad (2.2.1.)$$

ahol Φ a neutronfluxus és F a detektor érzékeny térfogatának a beérkező neutronok irányára merőlegesen vett felülete. Annak leírására, hogy az érzékeny térfogat térfogategységében egységnyi neutronfluxus hatására

mekkora impulzusszámot kapunk, a C konverziós hatások fogalmát vezették be [8]:

$$C = S/V \quad (2.2.2.)$$

ahol V az érzékeny térfogat nagysága. Az energiafelbontás a spektrométerekre jellemző adat. Egy adott E energiájú neutronnyaláb energiáját az adott detektorral megvizsgálva a mérési összeállítás energiafelbontó képességét az eloszlásgörbe ΔE félérték szélességével vagy a $\Delta E/E$ mennyiséggel szokás megadni [8].



2.2.2. ábra: $\sigma(E)$ függvények a neutrondetektálás során felhasznált reakciókra [7]

A detektorok érzékenysége korlátozott, azaz a készülékbe bejutó neutronokat csak egynél kisebb valószínűséggel képesek érzékelni. Ez a valószínűség két tényező szorzatából áll: Egyik az adott magreakció valószínűsége (ami a reakció hatáskeresztmetszetétől és a konverter anyag sűrűségétől függ), a másik annak a valószínűsége, hogy a keletkező részecske a számára megfelelő detektorba jut. A legnagyobb érzékenységgű detektort úgy tudjuk létrehozni, hogy a konverter anyag és a detektor anyaga egymással megegyezik. Ilyenek pl. a hidrogéngáz töltésű ütközésszámlálók vagy a lítium-jodid szcintillátorok (${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$). Ezen reakciók hatáskeresztmetszetének az energia függését mutatja be a 2.2.2. ábra [6,7].

Ha a neutronok energiája nem lényeges, csak a vizsgált részecskéket kell megszámlálni, akkor a kimutatni kívánt neutronokat először termikus energiára lassítják le, mivel ekkor, a detektor anyagától függően, a hatáskeresztmetszet nagy, ezért kevesebb konvertanyagot kell használni. A legtöbb neutronszámláló a termikus neutronokat detektálja, így a gyorsneutronok vizsgálatánál nagy hidrogéntartalmú közegeket (pl. paraffint vagy polietilént) használnak. Néhány példa: 1. A BF_3 számláló működése a $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ magreakción alapul. A bór ebben az esetben egy proporcionális számláló gáztöltését alkotja. Ez a számláló a ^{10}B izotóp nagy hatáskeresztmetszete miatt neutronokra érzékeny, más részecskékre azonban nem, mert az α - és β -részecskék a számláló falában elnyelődnek, míg a γ -sugarak által kiváltott elektronok csak kis energiát adnak le a számlálócsőben. 2. A ^6Li izotópon alapuló szcintillációs számlálóokban a $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ magreakciót alkalmazzák. A reakció során $\sim 4,7\text{MeV}$ energia szabadul fel, ami az α - és ^3H részecskék között oszlik meg. Ezen energiamegnövekedés segítségével különítik el a detektált részecskéket a többi sugárzástól. 3. A hasadási kamrákban nehéz magok (pl. U, Th, Pu) vékony rétegében a neutronok által kiváltott maghasadás a részecskeszámlálás alapja. A hasadási termékek összes energiája akár $\sim 200\text{ MeV}$ is lehet, amelyek ionizációs kamrával detektálhatók. A hasadványok nagy energiája és a kamra töltőgázában a magas fajlagos energiavesztés lehetővé teszi a neutronreakcióknak a többi részecske által előidézett magfolyamatoktól történő elkülönítését [6,7].

Egy neutron és egy proton rugalmas ütközésekor a protonnak megnő az energiája, a 2.1.6. egyenlet szerinti mértékben. Ha a proton energiáját és a szöveget is mérjük, akkor a neutron energiáját is megkaphatjuk. Ez a folyamat játszódik le a meglökéses detektorban: egy neutronnaláb műanyag fóliára esik, ahol protonok keletkeznek. Azok a protonok, amelyek a neutronsugárzás irányába távoznak, a teljes neutronenergiát átveszik. A keletkezett részecskék először egy proporcionális számlálóba kerülnek, amelyben a dE/dx fajlagos energiavesztés mérhető, majd egy félvezető vagy szcintillációs számlálóba jutnak, ahol elnyelődnek és így teljes energiájukat mérni lehet. Az oldalirányban szóródott protonok nem jutnak el a második számlálóba, így nem detektálhatók. Az első számláló feladata az, hogy kiszűrje a γ -sugárzás által keltett elektronokat és ilyen módon a háttérrel csökkentse. A visszalökéses számlálók esetén a neutronoknak $\geq 1\text{MeV}$ energiájúaknak kell lenni, hogy a protonok hatótávolsága elég nagy legyen ahhoz, hogy a második számlálót még szinte teljes energiájukkal el tudják érni. A detektor érzékenysége a vékony konverziós fóliák miatt kicsi, de így a protonoknak a fóliában történő energiavesztése elhanyagolható lesz. Megjegyzés: az

érzékenység megnövelhető úgy, hogy nagy hidrogéntartalmú szcintillációs anyagot használunk konverziós fóliaként, amely már maga is mérni tudja a protonok energiaveszteségét [6,7,9].

Adott energiájú neutronok hatására egy adott közegben is különböző hatáskeresztmetszetű folyamatok mehetnek végbe, ezért a neutronok kimutatására többféle módszert lehet alkalmazni. A magreakciók hatáskeresztmetszete azonban függ a bombázó részecskék energiájától, ezért a reakciótypust és a hozzá kapcsolódó neutronenergiát gondosan meg kell választani a kimutatni kívánt neutronok energiájától függően. Megjegyzés: a különböző izotópokra vonatkozó $\sigma(E_n)$ értékeket különböző táblázatok tartalmazzák pl. [12]. A neutronok által indukált magreakciók küszöbenergiáit a következő összefüggés jól közelíti [13]:

$$E_{\min} = -Q(m_{\text{mag}} + m_n)/m_{\text{mag}} \quad (2.2.3.)$$

ahol m_{mag} és m_n a céltárgymag és a neutron tömege, Q pedig a reakció energiája. A [13] alatti táblázat 9 különböző reakcióra: (n,p) , (n,α) , $(n,2n)$, (n,γ) , (n,d) , (n,np) , $(n,^3\text{H})$, $(n,^3\text{He})$, $(n,n'\alpha)$ adja meg a küszöbenergiákat és a keletkező végmagok felezési idejét. Mivel a neutronokat az adott reakcióban keletkező részecskék segítségével mutatjuk ki, ezért az utóbbiak azonosítása nélkülözhetetlen. Erre jól használható a neutronok rugalmas szóródása könnyű atommagokon. Ez utóbbiak közül is legjobb tulajdonságokkal a hidrogén atommagja rendelkezik, mivel a magnak átadott átlagos energia ebben az esetben a legnagyobb (lásd a 2.2.3.-as összefüggést). A reakció hatáskeresztmetszete is viszonylag nagy, széles energiatartományon belül is folytonosan változik és megfelelő pontossággal ismert. Továbbá a szórás szögeloszlása is izotróp ~ 10 MeV energiáig. Így ez a szórási folyamat a neutrontektálásban fontos szerepet tölt be [8].

Lassú neutronok észlelésére az α -részecskéket, ill. protonokat termelő exoterm reakciókat használják. A $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ magreakciót gyakran alkalmazzák lassú neutronok kimutatására, mert a hatáskeresztmetszete alacsony neutronenergiáknál nagy (a σ értéke 0,025eV esetén ~ 4000 barn) és néhány keV-ig fordítottan arányos a neutronok sebességével (lásd a 2.1. alfejezetet). A $\sigma(E_n)$ függvényben $\sim 1,9$ MeV energiánál egy csúcs van, amelynek értéke $\sim 0,4$ barn. Magasabb energiaértékeknél már más magreakciók hatása lesz a számottevő pl. a $^{10}\text{B}(n,p)$ - vagy $^{10}\text{B}(n,^3\text{H})$ -reakcióké. A különböző detektorokban a bórt többféle vegyület tartalmazhatja. Pl. a BF_3 proporcionális számlálókban az anyag gáz halmazállapotú, a szilárd halmazállapotú B_2O_3 vegyületet szcintillációs detektorokban, a metil-borát oldatot pedig szerves szcintillátorokban

használják. A $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reakcióban keletkező α -részecskék és lítium magok hatótávolsága rövid, ezért teljes energiájukat a detektor anyagában adják le, ami a detektálás szempontjából előnyös [8].

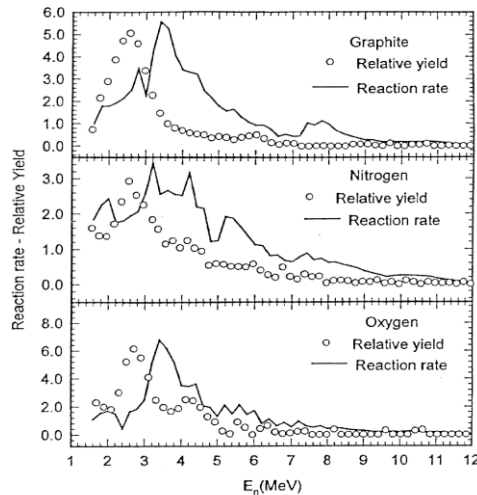
Az izotópok egy része neutronokkal való besugárzás hatására radioaktívvá válik és β -, ill. γ -részecskéket bocsát ki. Ha az ilyen anyagokból kisméretű, néhány cm^2 -es fóliákat készítünk, majd a β -, ill. γ -aktivitásukat mérjük, akkor a kapott eredményből megadhatjuk az eredeti neutronfluxust. A neutronokkal való aktiválás folyamatát kétféleképpen tudjuk felhasználni: a prompt γ -sugárzást, ill. a kialakuló indukált sugárzást mérhetjük. A prompt γ -részecskéket detektálhatjuk pl. kadmiumot tartalmazó nagy térfogatú folyadék-szcintillátorokban. De ennél a módszernél jóval gyakrabban használt a radioaktívvá váló fóliák aktivitásának vizsgálata. Ez a módszer alkalmas a neutronfluxus abszolút és térbeli eloszlásának mérésére. Hátránya a módszernek az, hogy a neutronfluxust nem kapjuk meg azonnali eredményként, hanem a detektorfóliát ki kell venni a mérendő neutrontérből és külön megmérni az aktivitását [8].

A lassú neutron aktivációs detektoranyagok között fontos szerepet játszik a mangán, az $^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ reakció révén. Az MnSO_4 vizes oldata ($\sim\text{m}^3$ mangánfürdő) kedvezően alkalmazható neutron reakciók abszolút hozamának mérésére. (Lásd Koltay vizsgálatát a $^9\text{Be}(d,n)$ reakció abszolút hozamának meghatározására [28]).

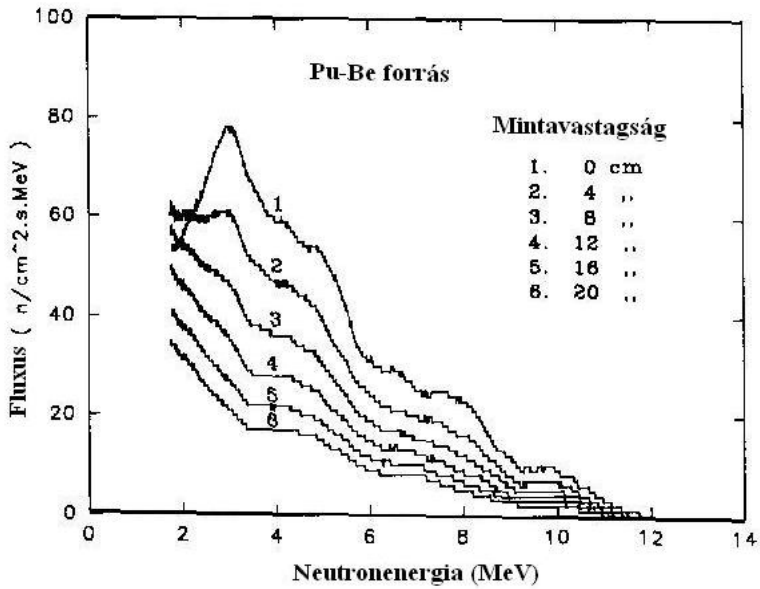
A méréshez detektorként használt anyagok kiválasztásánál több szempontot kell figyelembe venni. 1. Termikus neutronokra nagy legyen a befogási hatáskeresztmetszetük. 2. Aktivációs hatáskeresztmetszetük a termikus energiatartományban v^{-1} szerint változzék. 3. Gamma-aktivitásuk felezési ideje összevethető legyen a β -, ill. γ -aktivitásuk mérési idejével. 4. A mérés ideje alatt csak egy adott bomlási folyamatnak legyen szerepe [8,21,24].

A neutron-spektrométereknek két csoportja van: A gyors neutronok esetén lehetséges a keletkezett töltött részecskék energiáját a detektorban impulzus-amplitúdóként mérni. A lassú neutronok spektrumát pedig a detektálásuktól függetlenül kell meghatározni. A legegyszerűbb spektrométerekben proporcionális számláló és szcintillátorok tartalmazzák a konvertanyagot. Erre a célra pl. metán, hidrogén vagy ^3He töltésű kamrákat használnak. (A konverziós reakció: neutronok rugalmas szóródása protonokon, ill. $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$). Szcintillátorként pedig nagy hidrogén tartalmú szerves folyadékokat (pl. NE213-t, stilbént, toluolt) alkalmaznak, továbbá olyan lítium-jodid kristályokat, amelyek ^6Li izotóppal vannak dúsítva. Az ilyen spektrométerekben a töltött részecske által kiváltott impulzusnak megfelelő amplitúdót nem lehet egyértelműen

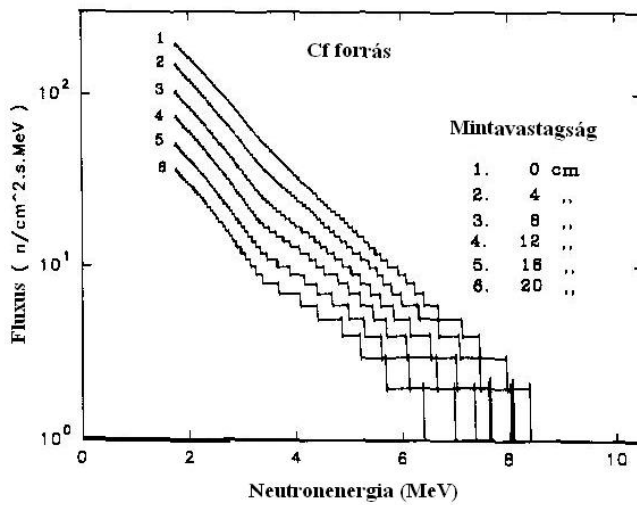
egy adott neutronenergiához rendelni, hanem minden neutronenergiához a töltött részecskék egy adott energiaspektruma tartozik. Pl. a proton-meglökéses spektrométerben a meglökött proton energiája a nulla energia és a neutron eredeti energiája közötti intervallumban mindenhol egyformán valószínű. Erre jó példa a D+T reakcióból származó 14MeV energiájú neutronok okozta téglalap alakú impulzuseloszlás [29]. A lítium-jodid spektrométerben a mért impulzus-amplitúdó attól függ, hogy a keletkezett töltött részecskére jut-e a több energia. Az előbbieken vázoltak is az okai annak, hogy a kísérletek során vizsgált neutronspektrumot a töltött részecskék általunk mért spektrumából kell számítógép segítségével visszszámolni (lásd pl. [29,30]). A színeképek egyszerű vizsgálata azokban az esetekben lehetséges, ha a spektrumban csak néhány különálló vonal található meg. Egy neutron energiájának a méréséhez nem elegendő az, ha csak a keletkezett töltött részecskék energiáját mérjük. Koincidenca-technikával meg kell mérni pl. a meglökött részecske szórási szögét vagy valamilyen módon megvizsgálni, hogy minden regisztrált esemény csak egy adott magreakciófajtából származik-e. Így több részecskedetektorra van szükség és a konverziós anyagnak olyan vékonynak kell lennie, hogy az összes keletkezett töltött részecske el tudja hagyni. Ez azonban csökkenteni fogja a módszer érzékenységét [6]. Megjegyzés: példaként bemutatunk néhány spektrumot a leggyakrabban használt neutronforrásokkal kapcsolatban [31,32].



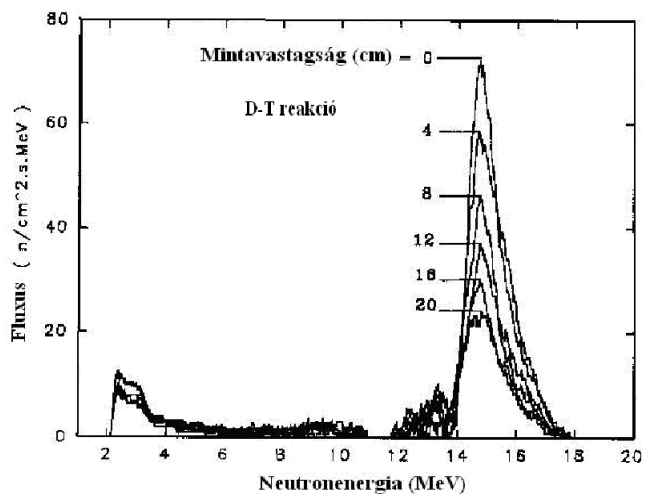
2.2.3. ábra: Pu-Be forrás mért visszszórási spektrumai (○) és az MCNP számítással kapott reakciósebességek (—) C, N és O esetén [31]



2.2.4. ábra: Pu-Be forrás spektrumának torzulása lengyel szénminta vastagságának függvényében [32]



2.2.5. ábra: ^{252}Cf forrás spektruma lengyel szénmintán áthaladva [32]



2.2.6. ábra: D-T reakció 14MeV energiájú neutronjainak hozama lengyel szénmintán áthaladva [32]

2.3. A neutronokon alapuló vizsgálati módszerek

A vizsgálataink során két módszert alkalmaztunk: az egyik a neutron aktivációs analízis (NAA), a másik pedig a neutron-reflexiók eljárás.

2.3.1. Neutron aktivációs analízis

Aktivációs módszer segítségével gyorsan és nagy érzékenységgel lehet megvizsgálni az anyagok elemi összetételét. A vizsgálandó mintát először neutronokkal besugározzák, amely hatására magreakciók indulnak be és különböző radioaktív izotópok keletkeznek. Neutronforrásként pl. ^{226}Ra -Be, ^{210}Po -Be, ^{239}Pu -Be források használhatók, amelyekből (α, n) reakció után néhány MeV-es energiájú részecskék nyerhetők. Alkalmazhatók neutrongenerátorok is, amelyeknél $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ reakció segítségével monoenergiás 14MeV-es neutronokat kapunk. Atomreaktorokat is lehetséges neutronforrásként használni, amelyek előnye a kapott sugárzás nagy termikus fluxusa (akár 10^{13} n/cm²s). A felaktiválódott anyag által kibocsátott sugárzások energiája, típusa és intenzitásának időbeli változása jellemző a besugárzott atommagokra. Az elemzés során az abszolút aktivitás méréséből, a besugárzó neutronnyaláb fluxusából és a reakció hatáskeresztmetszetéből a besugárzott izotópok mennyisége kiszámolható. A kutatók azonban egy másik módszert is használnak: a meghatározandó elem ismert mennyiségét is besugározzák az ismeretlen mintával megegyező körülmények között, majd a két minta aktivitását összehasonlítják és az arányukból kiszámolják az ismeretlen mintában lévő izotópok mennyiségét. Az előbbi eljárást az aktivációs analízis abszolút, az utóbbit pedig a relatív módszerének hívják [7,8].

A NAA érzékenységét a detektált részecskék száma határozza meg. Ez függ a besugárzó neutronok számától, a besugárzási és a mérési időtől, a magreakció hatáskeresztmetszetétől és a mérőrendszer tulajdonságaitól. Normál körülmények között kb. 65 különböző elem esetén $\sim 0,05\mu\text{g}$ -nyi mennyiség még kimutatható. A legkönnyebb elemek (kb. oxigénig), valamint a P, S, Tl és Bi kivételével az összes, természetben megtalálható elem kimutatható neutronaktivációs módszerrel. (A 2.3.1. táblázat mutatja be, hogy mely elemeket lehet kimutatni aktivációs analízissel.) Aktivációs analízis esetén az érzékenységet befolyásolja, ha a mérendő izotópból származó sugárzás mellett más forrás hatása is szerephez jut. Ilyen esetben különböző radiokémiai eljárások segítségével elválasztják egymástól a mérendő és a zavaró sugárzást kibocsátó részecskéket. Esetleg kihasználják, hogy a különböző izotópoknak más a felezési ideje vagy koincidencia-mérésekkel javítják az érzékenységet [7,8].

a mérés kezdetéig, t_1 idő elteltéig, marad $N_1(t_1) = N(t_i)\exp(-\lambda t_1)$, míg a mérés befejeződéséig, vagyis t_2 idő elteltéig, marad $N_2(t_2) = N(t_i)\exp(-\lambda t_2)$ darab atommag. A mérés során kapott ΔN beütésszám a mérés ideje alatt elbomlott atommagok számával lesz arányos (ez az időtartam t_2-t_1 , ha mindkét időintervallumot az aktiválás végétől, mint nullponttól mértük) [7,8]:

$$\Delta N = N_1(t_1) - N_2(t_2) = N(t_i)\exp(-\lambda t_1) - N(t_i)\exp(-\lambda t_2) \quad (2.3.2.)$$

$$\Delta N = N_0[\exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2)] \quad (2.3.3.)$$

ahol $N(t_i) = N_0$ rövidítést használtunk. A különböző mérési eredmények összehasonlításához mindig vissza kell számolni az aktiválás utolsó pillanatára, vagyis az N_0 -t kell megadnunk, természetesen a hűlési idő figyelembevételével (hiszen eközben is elbomlott a keletkezett radioaktív izotópok egy része). Ezután a minta besugárzás utáni aktivitását az N_0 és a bomlási állandó ismeretében kiszámolhatjuk, valamint az aktivitás értékéből következtethetünk a vizsgált minta tulajdonságaira [8].

2.3.2. Neutron-reflexiók eljárás

A másik általunk használt mérési módszer a neutronok szóródásán alapul. Amennyiben a neutronok anyagi közegen haladnak át, akkor kölcsönhatásba léphetnek a közeg atommagjaival: szóródhatnak és el is nyelődhetnek. Ennek hatására megváltozhat a fluxusuk, mozgási irányuk és energiájuk. Ezeknek a hatásoknak mértéke izotóponként eltérő, ezért vizsgálatukból a minták kémiai összetételére lehet következtetni [8].

Az atommagok eltérő befogási és szórási hatáskeresztmetszettel rendelkeznek. Termikus neutronok esetén nagy az abszorpciós tulajdonsága pl. a diszpróziumnak és a kadmiumnak, a legnagyobb szórási hatáskeresztmetszete pedig a hidrogénnek van. Saját vizsgálataink szempontjából nagy jelentőségű a hidrogéntartalom-meghatározás, amelynek az alapja általában valamilyen neutronszórás, ill. neutrontranszmisszió alapuló mérés. A neutronszórás és –lassulás elve alapján már korábban is készítettek könnyen kezelhető műszereket, amelyeket különböző területeken használtak fel nagyméretű minták hidrogéntartalmának meghatározására, pl. különböző talajminták, ill. betonelemek nedvességtartalmának vizsgálatánál [8].

A neutronok energiája rugalmatlan és rugalmas ütközések hatására csökkenhet. Adott neutronenergia alatt már csak rugalmas ütközés lehetséges abban az esetben, ha a részecskének már nem lesz elegendő

energiája a közeg atommagjainak gerjesztéséhez. Pl. egy gyors neutron csak kezdetben szenved rugalmatlan ütközéseket, azután az energiáját rugalmas szórásokban veszíti el. Az egy rugalmas ütközésben átlagosan leadott energia fordítottan arányos a szóró atommag tömegével. A neutronok lassításában a fő szerep a hidrogénatomoké, főleg ha más könnyű elem nincs a vizsgált mintában. A neutronszórás alapján működő hidrogéntartalom-mérő berendezések fő alkotórésze egy gyorsneutronforrás (pl. (α, n) forrás) és egy epitermikus- vagy termikus neutronokra érzékeny detektor. A detektor lehet In vagy Cd fóliával burkolt GM-számláló, BF_3 vagy ^3He töltésű proporcionális- vagy szcintillációs számláló [8].

A méréseink során a neutronszóráson alapuló fluxus mérésekhez BF_3 gáztöltésű proporcionális számlálót használtunk. A mérés során az érzékenység növelése miatt a számlálósövet végablakos elrendezésben szokták használni úgy, hogy a vizsgált részecskenyaláb a cső tengelyével párhuzamosan lépjen be a detektortérbe. A neutronok ugyanis így teszik meg a legnagyobb távolságot a BF_3 gázban, ezért megnő a detektálás valószínűsége. A csőbeli abszorpció növelése céljából ^{10}B izotóppal dúsított vegyületet használnak és törekednek a minél nagyobb gáznyomásra. A számlálóső átmérője a neutronnyaláb átmérőjétől függ, a hosszának pedig akkorának kell lennie, hogy megfelelő legyen a számlálás hatékonysága az alkalmazott gáznyomás mellett. A diffrakciós mérésekhez azért használnak proporcionális számlálót, mert a csőbe jutó γ -sugarak által kiváltott impulzusok így megkülönböztethetők lesznek az általunk mért neutronimpulzusoktól. A γ -részecskék ugyanis kevesebb töltéshordozót keltenek, mint a bóratomokkal kölcsönhatásba lépő neutronok, így kevesebb impulzust hoznak létre. Mivel erősítő rendszert is építenek a műszerbe, ezért a felerősített impulzusok közül a rendszer diszkriminátora csak a neutronoktól származó jeleket engedi át a számláló fokozatra és így a mérés pontosabb lesz, valamint a háttér is lecsökken [8].

2.4. A dolgozat témájához kapcsolódó korábbi debreceni vizsgálatok

A NAA és a neutronszóráson alapuló eljárások gyakorlati felhasználási területe igen széleskörű. Hazai és külföldi kutatók a vizsgálataik során sokféle felhasználási módszert, alkalmazást dolgoztak ki. A Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén és az MTA Atommagkutató Intézetében a magfizikai háttér és az alkalmazott neutronfizika eredményeinek felhasználása segítette elő a kábítószerek és a robbanóanyagok kimutatásával kapcsolatos módszerek kidolgozását, ill. a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által koordinált programokban (CRP) való részvételt (lásd pl. [4]). (Megjegyzés: a NAÜ 1997-ben indított el egy CRP-t, „Bulk Hydrogen Analysis using Neutrons” címmel [33], amelyet követett a tiltott és veszélyes anyagok kimutatását szolgáló program 1999-2003 között, „Application of Nuclear Techniques to Anti-Personnel Landmines Identification” címmel [34].) A korábbi kutatásokat (a teljesség igénye nélkül) két összefoglaló tanulmány ismerteti [35,36]. A nagyméretű minták kémiai analízisével foglalkozó kutatási eredmények közül különösen fontosak a következőkben felsoroltak, mivel ezek a neutronok további tudományos és gyakorlati alkalmazásait segíthetik elő.

1. Buczkó és munkatársainak a termikus neutronok reflexiójára vonatkozó kutatásai alapján kidolgozták a BITATRON (Bitumen és Talaj Analizáló Berendezés) mérőberendezést, amelyet NAÜ támogatással is sikeresen alkalmaztak aszfalt minták analízisére [37].

2. Buczkó és Borbély a ^{252}Cf forrás felhasználásával megvizsgálta, hogy vastag abszorbeáló (Dy és Au) fóliák hogyan befolyásolják az átlagos aktiváló neutronfluxust. A kapott eredmények szerint (lásd a 2.4.1. és a 2.4.2. egyenleteket, ill. a 2.4.1. ábrát) ennek értéke egy egyszerű analitikus összefüggéssel megadható termikus és epitermikus neutronok esetén [38].

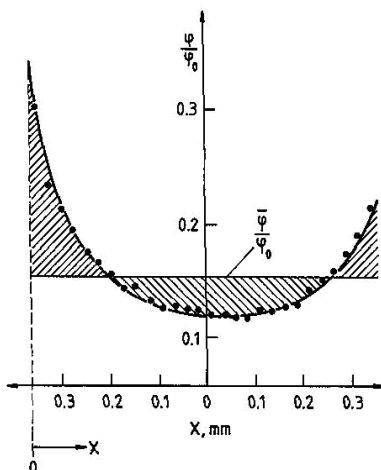
$$\text{A fluxuseloszlás:} \quad \Phi(x) = (ax^2+bx+c)^{-1} \quad (2.4.1.)$$

$$\text{Az átlagos fluxus:} \quad \Phi_{\text{ave}}(x) = x^{-1} \int_0^x \Phi(x)dx \quad (2.4.2.)$$

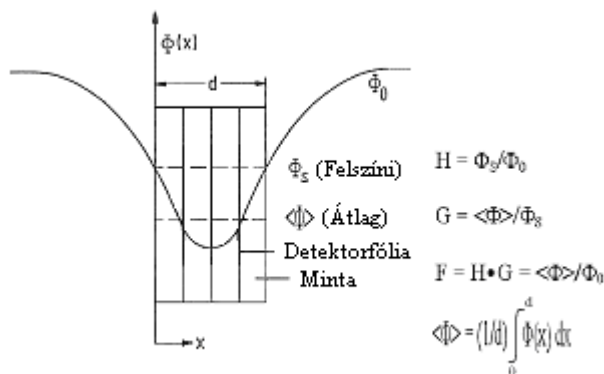
ahol x a minta felszínétől mért távolság, a , b és c pedig a mért adatokból számított együtthatók.

3. Debrecen-Tsukuba (Japán) együttműködésben kidolgoztak egy egyszerű módszert a termikus és epitermikus neutronok átlagos fluxusához tartozó perturbációs faktor meghatározására vastag, abszorbeáló minták esetén. Méréseikhez Am-Be neutronforrást

használtak, majd a neutronfluxus térbeli eloszlásának a változását vizsgálták hidrogéntartalmú-, ill. grafit moderátorok alkalmazásával [39,40]. Később több hasonló vizsgálat is történt, lásd pl. [41,42]. (A fluxus-eloszlás megadásának módját mutatja be a 2.4.2. ábra.)



2.4.1. ábra: Fluxuseloszlás vastag abszorbeáló detektorban [38]



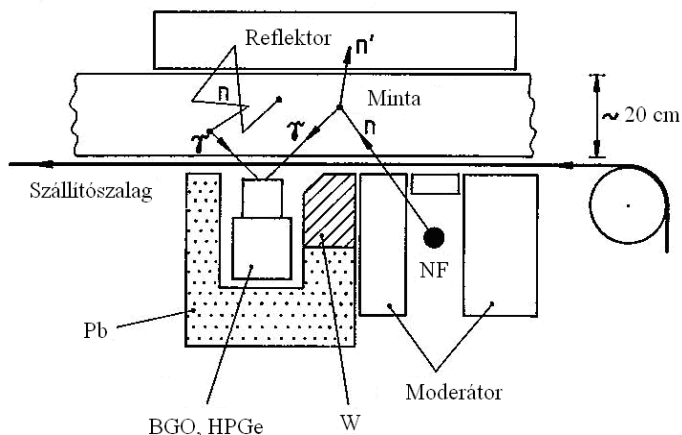
2.4.2. ábra: A neutronfluxus perturbációs faktorának javasolt meghatározási módszere [43]

4. Dóczi és Csikai összehasonlították a NAA-t és a termikus neutronok közvetlen detektálásának módszereit. Azt kapták, hogy a módszerek együttes alkalmazásával akár 10 cm vastagságú minták analízisét is el lehet végezni néhány perc alatt egy kisméretű BF_3 számláló segítségével [44,45]. (Megjegyzés: hasonló vizsgálatot ír le pl. a [46] tanulmány.)

5. Csikai és Dóczi vizsgálták az ún. ETNA (Epithermal Neutron Analyzer) mérési összeállítást. Ezzel a módszerrel $\sim 30 \times 30 \times 20$ cm³-es nagyságú, hasáb alakú minták hidrogén tartamát határozták meg. Azt tapasztalták, hogy a méréshez a Pu-Be forrás hatékonyabban használható, mint a ²⁵²Cf neutronforrás [47]. Dóczi és munkatársai Am-Be neutronforrások, ill. In és Dy aktivációs fóliák segítségével vizsgáltak nagyméretű, hidrogéntartalmú mintákat. Korrelációt állapítottak meg a minták hidrogéntartalma és a neutronfluxus között, valamint kimutatták, hogy az ETNA összeállítás esetén a mintákat Cd edénybe helyezve ~kg, ill. ~liter méreteket is könnyen lehet analizálni [48], ill. a vizsgálat érzékenysége közel hússzorosára is növelhető a reflexiós módszerhez képest [49]. Az ETNA módszer hasonlóan az (n,n' γ) típusú reakciókban keletkező γ -részecskék detektálásához, jól használható repülőtereken a szállítószalagokra helyezett csomagok vizsgálatára (2.4.3. ábra).

A Debrecen-Tsukuba kísérletekben megmutatták [39], hogy a nagyméretű minták kémiai analízisére kedvezőbb a grafitmáglya alkalmazása (2.4.4. ábra), mint a hidrogénes moderátor.

6. A neutronok lassulása és reflexiója kedvezően alkalmazható plasztik robbanóanyagot tartalmazó taposóaknák kimutatására. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által 1999-ben indított program keretében kidolgoztak egy, a kísérletekhez használható, taposóakna-utánzatot (típusa: DLM2), amelyet Debrecenben is használtunk a méréseink során. (A DLM2 leírásával kapcsolatban lásd pl. [50,51].)



2.4.3. ábra: Mérési elrendezés szállítószalagra helyezett minták analízisére [7, módosítva]



2.4.4. ábra: Mérési elrendezés grafitmáglyába helyezett minta analizésére [49]

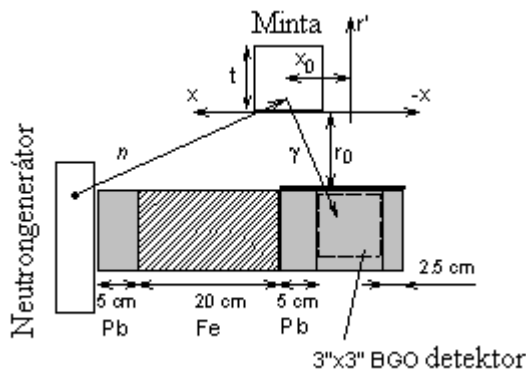
A neutronok lassulásán alapuló kézi mérőeszköz alkalmazása lehetővé tette a talajkörnyezetben elhelyezett plasztik robbanóanyag töltésű taposóaknak kimutatását $1\text{m}^2/1,5\text{perc}$ szkennelési sebességgel, kb. 5-6 cm mélységi érzékenység mellett [52].

A PELAN (Pulsed Elemental Analyses with Neutrons) mérési elrendezést mutatja be a 2.4.5. ábra, amelyet Debrecen-Bowling Green (USA) együttműködésben használtak [53,54,55]. A mérés azon alapul, hogy a nagy áthatoló képességű 14 MeV-es neutronok és a karakterisztikus γ -sugarak (2,23, 4,44, 10,8 és 6,13 MeV energiával H, C, N és O esetén) felhasználhatók a nagyméretű minták elemvizelésére.

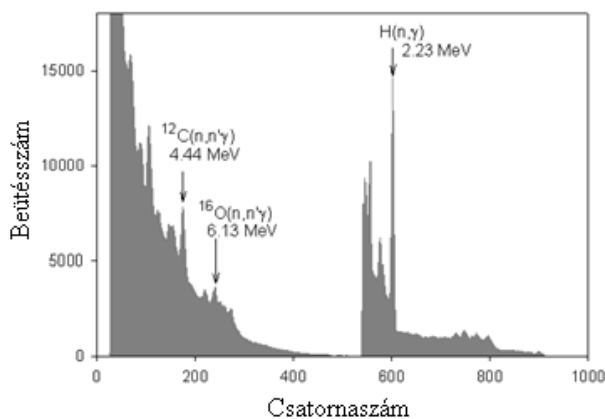
A 2.4.6. ábrán látható, hogy a 4,44 és 6,13 MeV-es γ -vonalak, amelyek a ^{12}C és ^{16}O izotópokon történt $(n,n'\gamma)$ rugalmatlan szórás során keletkeztek, jól detektálhatók $10\mu\text{s}$ mérési idő alatt, míg a $\text{H}(n,\gamma)$ reakcióból származó 2,23 MeV energiájú γ -sugárzás, $90\mu\text{s}$ időintervallumban. (A neutrongenerátor 10kHz impulzusüzeme esetén).

A $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)$ reakcióból származó 4,44 MeV-es γ -sugarak szögeloszlása a következő összefüggéssel írható le: $W(\Theta)/W(90^\circ) = 1+0,6\sin^2(2\Theta)$ [17]. Azonban a módszer sikeres alkalmazásához ismerni kellene az $^{16}\text{O}(n,n'\gamma)$ reakcióból származó 6,13 MeV-es részecskék szögeloszlását is [56]. Ugyanis a 2.4.5. ábrán bemutatott elrendezésben a neutronforrás és a gamma-detektor között a vizsgálandó minta bárhol lehet, ami a szögértéket és azon keresztül a C/O arány meghatározását befolyásolja.

A talajban elrejtett robbanóanyagok kimutatásával számos kutató foglalkozott, különböző módszereket felhasználva, azok lehetőségeit kombinálva, lásd pl. [57,58,59,60,61].



2.4.5. ábra: A PELAN egyik mérési elrendezése [56]



Prompt tartomány (10 μ s) Késleltetett tartomány (90 μ s)

2.4.6. ábra: Kokainutánzat hatására kialakuló, prompt és késleltetett γ -spektrumok [52]

7. ElAgib és munkatársai (Debrecen-Szudán) egy Pu-Be forrás megszökési (leakage) spektrumát vizsgálták gömb alakú minták felhasználásával. Mintaként vizet, paraffinolajat, kvarc-és folyami homokot használtak [62]. Hasonló méréseket végeztek a Pu-Be forrás szórási és megszökési spektrumaira különböző geometriában [63,64]. A mért spektrumok jól egyeztek az MCNP számítások eredményeivel.

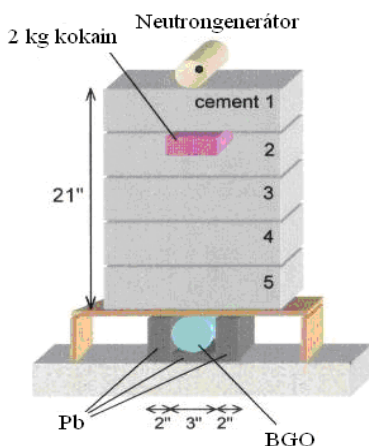
8. Csikai és ElAgib Pu-Be neutronokat bocsátottak különböző mintákra és a kapott rugalmas szórási spektrumot vizsgálták NE213 szcintillációs detektorral. A mérés célja a mintákban lévő szén-, hidrogén-, oxigén- és nitrogéntartalom meghatározása volt, amiből a mintában esetlegesen

elrejtett szerves anyagok (és így kábítószerek, robbanóanyagok) jelenlétére lehet következtetni [31].

Egy kanadai szerző [65] értékelése szerint a visszaszórt neutronok spektrumának Debrecenben alkalmazott „unfolding” módszere [61] ígéretesnek látszik tiltott anyagok észlelésére.

9. Amaldi és Fermi módszerét [2] Csikai és Buczkó fejlesztette tovább oly módon, hogy bevezették a neutron reflexiós hatáskeresztmetszet fogalmát [66]. Ezt a módszert alkalmaztuk mi is vizsgálataink során, más kutatókkal együtt (lásd pl. [67]).

10. Debrecenben egy nemzetközi kutatócsoport (Szudán, Líbia, Nigéria, Mianmar) a hazaiakkal együtt részletesen vizsgálta a neutronok alkalmazási lehetőségeit a tiltott anyagok kimutatására nagyméretű anyagminták analízisével [32]. A vizsgálatokhoz a nagyáramú generátor 14 MeV energiájú neutronjait használták víz, kőszén és grafit vizsgálatára az (n,γ) reakció segítségével. Általánosságban is megjegyezhető, hogy a tiltott anyagok kimutatása során a neutronfizikai, a γ -spektrometriai vizsgálatokat kiegészítve a fémkereső módszerrel együtt érdemes alkalmazni, mivel így a vizsgált minták szerves anyag- és fémtartalmáról is információkat kaphatunk. (Megjegyzés: a 2.4.3. ábrán bemutatott módszer esetén a neutron-gamma közötti koincidencia-vizsgálatokkal még pontosabbá lehet tenni a mérési eredményeket a háttér lecsökkentése révén.) Hasonló rendszerek leírásával kapcsolatosak a [68,69] tanulmányok.



2.4.7. ábra: Mérési elrendezés cementmintában elrejtett tiltott anyag kimutatására [55]

11. A Debrecen-Bowling Green együttműködésben végzett kutatások során [53,54,55] D-T generátorral termeltek 14 MeV-es neutronokat, amelyeket nagyméretű mintákra bocsátva elemezték a keletkező γ -spektrumokat (pl. cementmintákban elrejtett kokainutánzat kimutatására). A kísérlet során a mintára jellemző C/O és C/H atomarányokat határozták meg. Eredményeiket MCNP számítások eredményeként kapott adatokkal is összevetették. (A mérési elrendezést lásd a 2.4.7. ábrán.)

12. Debrecen-Bagdad együttműködésben Al-Jobori és munkatársai kőolajok hidrogén-, oxigén- és széntartamát vizsgálták neutronreflexiós módszerrel. A minták alacsony oxigéntartalma miatt a C/H arányból a hidrogénkoncentrációra tudtak következtetni [70]. (Megjegyzés: további olajmintákon végzett mérések eredményei találhatóak meg pl. a [71]-ban.)

13. A tiltott és veszélyes anyagok legfontosabb összetevői: a H, C, N és az O, amelyek közül neutronreakciókkal a nitrogént nagyon nehéz meghatározni. Ezt többen az (n,2n) reakcióban keletkező ^{13}N aktivitásának mérésére alapozták. Így pl. a ^{13}N aktivitását használta Buczkó és Vas [72] a nitrogén meghatározására fosszilis csontokban.

14. Szegedi és munkatársai 14 MeV-es neutronok segítségével szójabab minták nitrogénkoncentrációját vizsgálták és a kapott eredményekből a fehérjék mennyiségére következtettek (a $^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$ reakciót használták). Eredményeiket a röntgen-fluoreszcencia és Kjeldahl-módszer segítségével kapott adatokkal is összehasonlították [73].

15. Szegedi és munkatársai zeolitok kristályvíz tartalmát vizsgálták, amelynek mennyiségéből következtetni lehet egy ismeretlen kőzetminta zeolit koncentrációjára [74].

16. Több kutató vizsgálta a neutronokra alapozott módszerek használhatóságát a bányászatban és a geológia területén. Vourvopoulos prompt gamma neutron aktivációs analízissel különböző szénminták minőségét vizsgálta [75], Csikai pedig egy előadásában összehasonlította a különböző módszereket [76]. (Megjegyzés: Vourvopoulos több tanulmányt írt a robbanóanyagok és kábitószeres kimutatásával kapcsolatban is. Lásd pl. [77,78].)

17. A NAÜ által koordinált programban résztvevő kutatóhelyek (Fredericton, Debrecen, Delft, Fokváros, Bécs, Groningen, Ljubljana, Padova, Bari, Pavia, Szentpétervár, Menai, Wollongong, Zágráb) fontosabb eredményeit az Applied Radiation and Isotopes egyik speciális kiadványa tartalmazza [79].

2.5. Tiltott anyagok kimutatásához kapcsolódó nemzetközi kutatások

Az előző alfejezetben említetteken kívül is, számos kutató foglalkozott a tiltott- ill., veszélyes anyagok kimutatásával. A munkáikból adnak ízelítőt (a teljesség igénye nélkül) az alábbiakban felsorolt tanulmányok:

1. Zhang és munkatársai heroin mintákban 15 különféle elemet vizsgáltak NAA segítségével. Azt kapták eredményül, hogy az általuk keresett elemek közül a minták legnagyobb koncentrációban kalciumot, cinket és nátriumot tartalmaztak, egyes nyomelemekből (pl. Au, Co és Th) pedig a koncentráció nem haladta meg az 1mg/g értéket. Vizsgálataik azt mutatták, hogy NAA segítségével hasznos információk kaphatók a drogok eredetére vonatkozóan [80].

2. Eberhardt és munkatársai egy szkennert teszteltek, amelynek segítségével repülőgépen szállítható konténereket lehet vizsgálni, konténerekként kb. kétperces időintervallum alatt. A berendezés nagy felbontású képet adott a minta anyagi összetételéről, gyors neutronokon-, ill. gamma-sugarakon alapuló leképezés segítségével. A sikeres tesztelés után a készüléket a Brisbane-i repülőtéren helyezték üzembe [81].

3. Zuccato és munkatársai kokaint és annak legfontosabb lebomlási termékét (benzoylecgonine, BE) kerestek a Pó folyó vizéből és olasz városok szennyvizéből származó mintákban tömegspektrométer segítségével. Azt tapasztalták, hogy a kokain és a BE mérhető mennyiségben van jelen a felszíni vizekben. A Pó naponta ~4kg-nyi kokainnak megfelelő anyagcsereterméket szállít, ami ezer lakosonként ~30 adagnyi drogot jelent. A városok szennyvizének vizsgálatánál ezzel megegyező értékeket kaptak [82].

Néhány évvel később Zuccato és Castiglioni egy tanulmányban összefoglalták az ebben a témában végzett eddigi vizsgálatok eredményét. A kísérletek azt mutatják, hogy a különböző kábítószer-maradványai a szennyvíz-tisztítás ellenére is megmaradnak és kibocsátódnak a felszíni vizekbe. A környezetbe kijutó koncentrációk alacsonyak, de kockázatot jelenthetnek az emberek egészségére [83].

4. Cecinato és munkatársai kábítószer-maradványokat kerestek Olaszország levegőjében. Összesen 39 mintavételi helyen mértek és a kokaint kimutatták majdnem minden helyszínen, még vidéki területeken is. A kokain mellett három cannabis-származékot vizsgáltak. Azt tapasztalták, hogy a tiltott vegyületek koncentrációja hatszor magasabb volt télen, mint nyáron. Az eltérés a légkör nyári, erősebb oxidáló hatásával lehet kapcsolatban. A kutatók a későbbiekben módszerüket fel szeretnék használni más kábítószer kimutatására is [84].

5. Hernández és munkatársai tömegspektrometrián, ill. kromatográfián alapuló módszereket használtak párhuzamosan, hogy gyógyszer- és kábítószer maradványokat mutassanak ki környezeti vízmintákban. Cikkük egy általános áttekintést ad ezekről a kísérleti módszerekről és ezzel kapcsolatban a drogok kimutathatóságáról a környezetből származó vízmintákban [85].

Hasonló módszert használt Chen szintetikus kábítószeres és azok bomlástermékeinek kimutatására. Azt tapasztalta, hogy a mérgezett patkányok májából kimutathatók az általa keresett vegyületek. Kísérletei azt bizonyították, hogy módszere nagy pontossággal és hatékonysággal alkalmazható drogok kimutatására [86].

6. Hargreaves és munkatársai egy hordozható Raman spektroszkóp segítségével vizsgáltak repülőtéri küldeményeket. Tanulmányukban bemutatták, hogy hogyan lehet a készült spektrumok segítségével az illegális anyagokat (pl. kokain- és amfetamin-származékok) elkülöníteni a többi összetevőtől [87].

7. Grange és Sovocool valós idejű, repülési idő tömegspektrometriát használtak metamfetaminok kimutatására. Ti. azokban az épületekben, ahol drogokat állítanak elő, a kábítószeres pora kiülepedik a különböző tárgyakra és az épület belső falaira. Tömegspektrometriával meg lehet állapítani a szennyeződés felületi eloszlását és hatékonyabbá lehet tenni az eltávolítását. A módszerrel 11 különféle kábítószeres tudtak kimutatni és egy minta kiértékelése ~2,5 percig tartott [88].

8. Bach és munkatársai vegyi fegyvereket és robbanóanyagokat próbáltak kimutatni 14 MeV-es neutronok segítségével kapott γ -spektrumok elemzésével. A vizsgálatokat korábban elvégezték más módszerekkel is, pl. neutronszórás alapuló technikával [89].

9. Brooks és munkatársai gyors neutronok szóródásán alapuló módszert használtak narkotikumok és robbanóanyagok kimutatására. Méréseik során szerves szcintillátorokat használtak a minták C, H, N és O tartalmának meghatározására [90,91]. A kutatásaik során különböző taposóakna-detektorok terepen történő tesztelését is elvégezték és azt tapasztalták, hogy ~10cm-nél nem mélyebben található aknák még nagy pontossággal kimutathatók [92].

10. Gokhale és Hussein ^{252}Cf neutronforrást és ^3He detektort használtak egy neutron-transzmissziós mérés során, amellyel műtrágya (robbanóanyag) mintákat vizsgáltak, nitrogén tartalmuk kimutatása miatt [93].

11. Pesente és munkatársai 14MeV energiájú neutron nyalábokat és BaF_2 szcintillációs detektorokat használtak különféle poggyászok laboratóriumi vizsgálatára. A csomagok belsejébe kisméretű robbanóanyagot helyeztek

el. Rendszerük alkalmas volt arra, hogy a TNT töltetet elkülönítse a környezetében lévő többi műanyagtól [94].

12. Clifford és munkatársai kísérletében ^{252}Cf forrással hoztak létre termikus neutronokat, amelyeket robbanóanyagok terepen való kimutatására használtak. A neutronok ^{14}N -el való kölcsönhatásuk során 10,835MeV energiájú gamma-sugarakat hoznak létre, amelyeket a kutatók NaI(Tl) detektorokkal vizsgáltak. A ~10cm-es mélységben lévő tankelhárító aknákat ~1perc időtartam alatt képesek voltak detektálni, de a távolabb lévők kimutatásához lényegesen nagyobb időintervallum volt szükséges. Az összeállítást többféle időjárású helyzetben is kipróbálták [95].

13. ElAgib és munkatársai talajkörnyezetbe rejtett robbanóanyagokról rugalmasan visszaszóródott neutronokat vizsgáltak Monte Carlo szimuláció segítségével, három különböző forrás igénybevételével. Arra az eredményre jutottak, hogy a gyors-, ill. lassú neutronok visszaszórási spektrumából azonosítani lehet a talajban lévő tiltott anyagot [96].

14. Nasrabadi és munkatársai a robbanóanyagok nitrogéntartalma miatt, nagy nitrogéntartalommal bíró vegyületeket (pl. melamint) vizsgáltak. Termikus neutronokkal váltottak ki reakciókat ^{14}N atommagokon és a keletkezett gamma-sugárzást detektálták NaI(Tl) kristályokkal. Azt tapasztalták, hogy a kísérleti eredmények jó egyezést mutatnak az MCNP számítások során kapott adatokkal [97].

15. Oxley és munkatársai azt vizsgálták, hogyan mutathatók ki az emberi hajszálakból a robbanóanyagok. A kutatások azt bizonyították, hogy különböző katonai célokra használható robbanóanyagok (pl. PETN, TNT és RDX) elnyelődnek az emberi hajban és hajmosás után is mérhető mennyiségben maradnak a mintákban. A vizsgálatok szerint a robbanóanyagokkal dolgozó tudósok és diákok ~80%-ánál lehetett kimutatni a PETN és ~40%-uknál a TNT és RDX nyomain [98].

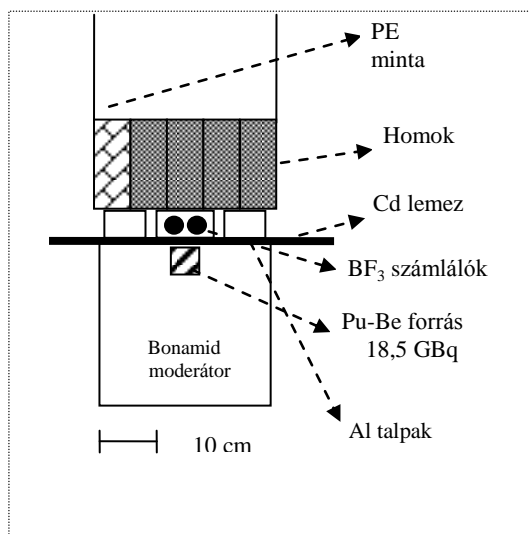
16. Több kutatócsoport foglalkozik olyan robotok kifejlesztésével, amelyek a korábban háború sújtott területeken végzik az aknamezők biztonságossá tételét. Doroftei és Baudoin tanulmányukban egy hatlábú robotról adnak leírást, amelyet Belgiumban terveztek a Humanitarian Demining Project keretében. Részletesen megadják, hogy az ilyen típusú robotoknak milyen feltételeknek kell megfelelniük [99].

17. A biotechnológia fejlődésével a kutatók kidolgoztak olyan közvetett módszereket a talajban található robbanóanyagok kimutatására, amelyek az élőlények biológiai funkcióival kapcsolatosak. Kabessa és munkatársai olyan genetikailag módosított baktériumokat használtak detektálásra, amelyek speciális fehérjéi zölden fluoreszkáltak robbanóanyagok gőzeinek jelenlétében [100].

3. Mérési módszerek és eredmények

3.1. Mérések az ETNA mérési összeállítással

Az általunk használt egyik mérési módszer az ETNA mérési elrendezésen alapult (lásd a 2.4. alfejezet 5. pontját és 3.1.1. és a 3.1.2. ábrákat). A kísérletek során neutronforrásként egy 18,5GBq aktivitású, $5,25 \times 10^6$ n/s intenzitású Pu-Be forrást használtunk. Megjegyzés: a forrás által kibocsátott neutronok energiája ~ 12 MeV-ig terjed 5MeV átlagos energiával, míg a spektrum maximuma 3MeV-nél található. A forrást 30cm átmérőjű, henger alakú bonamid ($C_6H_{11}ON$) moderátor függőleges szimmetriatengelyében helyeztük el, 2cm-re a moderátor felszíne alá. A felszínt egy 33×33 cm² alapterületű, 1mm vastagságú Cd lemezzel fedtük le, így a mérendő mintára már csak epitermikus neutronok estek be ($E_n > 0,5$ eV). A termikus és az epitermikus neutronok hozamát kettő darab, egymással párhuzamosan elhelyezkedő, henger alakú BF₃ számlálóval mértük, amelyek érzékeny térfogata 14cm hosszúságú és 2,3cm átmérőjű volt. (BF₃ detektort használtunk ³He helyett a jobb jel-zaj arány miatt.) Mintatartóként egy $\sim 30 \times 30 \times 20$ cm³-es hasáb alakú Al dobozt használtunk. (Ez a térfogat ~ 20 -szorosa a később ismertetésre kerülő BITATRON mérési összeállításnál használt maximális mintaméretnek.) [101,102]



3.1.1. ábra: Az ETNA mérési összeállítása [102, módosítva]



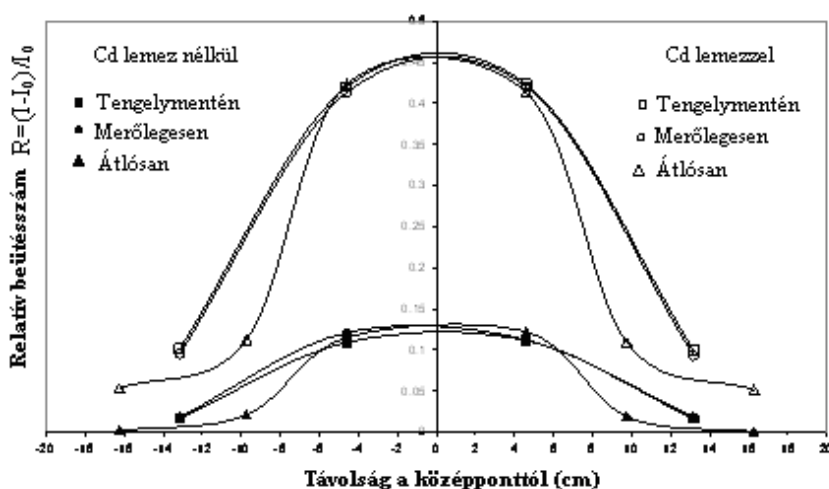
3.1.2. ábra: Az ETNA mérési összeállításban a detektor, ill. a mintatartó doboz mintákkal

Az ETNA rendszerrel végzett egyik kísérletben termikus és epitermikus neutronok fluxusának laterális eloszlását vizsgáltuk (Cd lemezzel és Cd nélkül). 1. Reflektorként $\sim 0,5\text{dm}^3$ térfogatú Al mintatartókba (sörös doboz) helyezett szárított folyamihomok-mintákat használtunk, amelyek közül az egyik ki volt cserélve granulált polietilénnel (PE, CH_2) teli dobozra és ennek változtattuk a pozícióját. 2. Az eloszlást vizsgáltuk, olyan módon is, hogy a BF_3 számlálókat a reflektor nélküli moderátor felszínén mozgattuk bal, ill. jobb irányba egy egyenes mentén [101].

A neutronok fluxusának síkbeli eloszlását háromféle módon mértük meg reflektor jelenlétében: a számlálók hossz tengelye mentén, arra merőlegesen és átlós irányban mozgatva a PE-nel teli mintatartót, ill. mindhárom irány esetén megvizsgáltuk a Cd borítású és az üres moderátorfelszín használatával. A 3.1.3. ábrán látható, hogy a relatív beütésszám, $R=(I-I_0)/I_0$, (ahol I , ill. I_0 a reflektorral, ill. reflektor nélkül mért beütésszám), mint a PE-nel telt mintatartó és a rendszer szimmetriatengelye közötti távolság függvénye, 0,46, ill. 0,13 maximális értéket adott a Cd lemez használatával, ill. nélküle. Megjegyzés: a homokreflektor segítségével, Cd lap használata nélkül mért I_0 háttér ~ 14 -szerese volt a Cd lappal mért értéknek. Reflektor nélkül, a moderátor felszínén történt háttérmérések esetén pedig ~ 12 -szeres volt ez az arány,

amely tény azzal van kapcsolatban, hogy a termikus neutronoknak a környezetben lévő tárgyról való szóródását elhanyagolhatjuk ebben az esetben. Megjegyzés: az adatokat másodfokú polinomokkal közelítettük [101].

Az üres moderátorfelszínen történt fluxuselozlás-mérések során azt tapasztaltuk, hogy az eloszláshoz tartozó FWHM értéke ~13cm Cd lemez használatával és nélküle is. Azonban reflektor és Cd lemez használata mellett az FWHM értékei 20cm, 21cm és 15cm, amely arra utal, hogy ilyen mérések során az epitermikus neutronok használata előnyösebb a termikusnál [101].

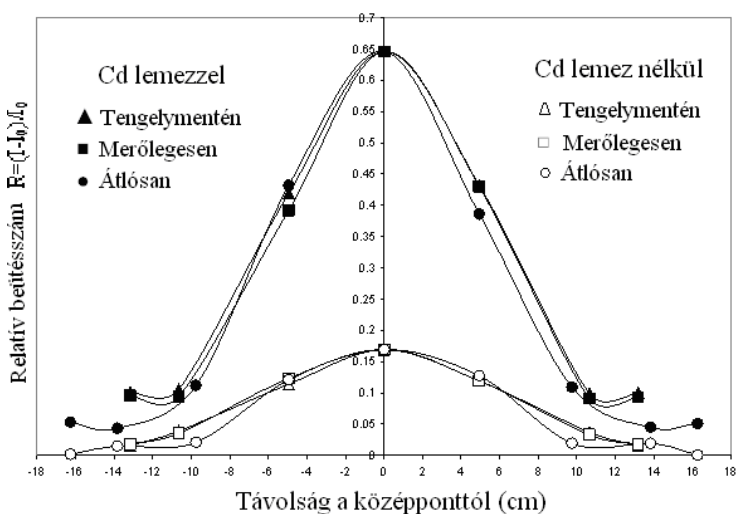


3.1.3. ábra: A neutronok síkbeli fluxusának eloszlása Cd lemezzel és nélküle [101]

Az ETNA mérési összeállítással végzett másik kísérletsorozat során: 1. Lemértük újra az üres moderátorfelszínen a síkbeli fluxuselozlást (Cd lemez használatával, ill. nélküle), de annyi változtatást tettünk, hogy a két BF₃ számlálót is beborítottuk egy Cd lemezből készült sapkával, hogy kiküszöbölhessük a környezet által szórt neutronok hatását. 2. Hasonlóan az előző mérési sorozathoz megvizsgáltuk a szárított folyami homok, ill. granulált PE töltésű sörösdoboz-mintatartók, mint reflektorok hatását. 3. A 2.4. alfejezet 6. pontjában említett DLM2 mintát papír, ill. ruhaanyag közé rejtettük el különböző mélységekben és tanulmányoztuk a beütésszámot a háttérhez viszonyítva. A DLM2 mintához hasonló mennyiségű hidrogént tartalmazó mintákat is készítettünk: PE, ammónium-nitrát (NH₄NO₃) és melamin (C₃H₆N₆) alkalmazásával. 4. Megvizsgáltuk azt az elrendezést is, hogy a nagy Al dobozt adott

magasságig megtöltöttük folyami homokkal és a DLM2 mintát különböző mélységben rejtettük el benne. Így változott a DLM2 és a detektorok közötti függőleges irányú távolság és reflektorvastagság [102].

Ahogy a 3.1.4. ábra mutatja, a neutronok felszíni fluxuselozlása erősen függ attól, hogy a mintát a detektorok hossz tengelyéhez viszonyítva milyen irányban mozgatjuk és változik attól függően is, hogy a moderátorfelszínen van-e Cd borítás. Az R , a relatív beütésszám, maximumát a rendszer geometriai középpontjában éri el és az értéke 0,64, ill. 0,17 Cd borítás, ill. annak hiánya esetén. Megjegyzés: a középpontban mért beütésszámok hányadosa ~ 10 . A szabad moderátorfelszínen végzett síkbeli fluxuselozlás mérése során kapott FWHM értéke ~ 12 cm volt Cd lap nélkül és használatával is. Ellenben reflektort is alkalmazva ~ 12 cm, ill. ~ 16 cm értéket kaptunk [102].

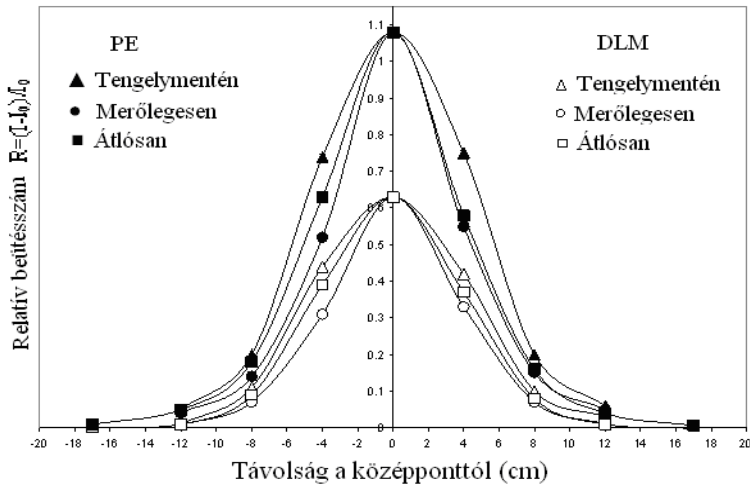


3.1.4. ábra: A neutronok síkbeli fluxuselozlása Cd lemezzel és nélküle [102]

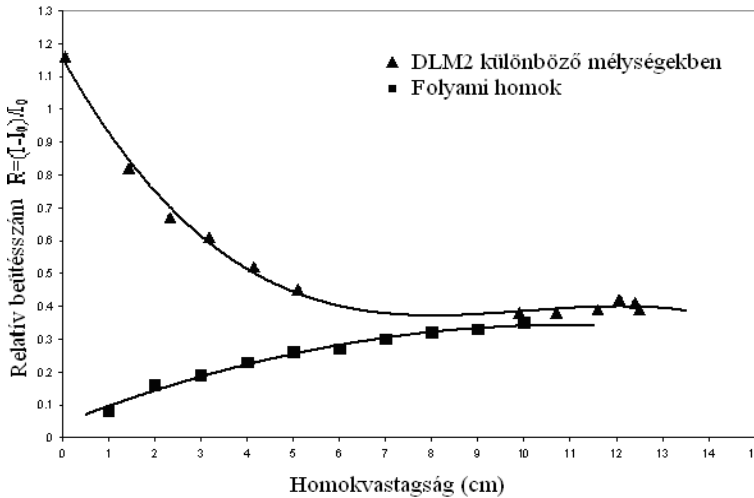
A telítési vastagságú folyami homok-reflektor segítségével mért I_0 háttér arányára Cd lemez használatával és nélküle is ~ 12 értéket kaptunk. A szabad moderátorfelszínen mért háttér aránya pedig $\sim 14\%$ a Cd lemez használatával és nélküle is. Azonban ez az arány $\sim 1\%$ -ra csökken, ha a detektorokon Cd sapka is van [102].

DLM2 és PE hidrogéntartalmú reflektorokat használva (11g, ill. 37g H) a fluxuselozásokhoz tartozó FWHM értékekre ~ 8 cm adódott (a Cd lemez használata mellett), amely jóval alacsonyabb, mint a szabad felszínhez tartozó hasonló adat (lásd a 3.1.5. ábrát). Ezért a plasztik robbanóanyagok kimutatásánál az epitermikus neutronok jobban

hasznosíthatók, mint a termikus és epitermikus neutronok együttesen [102].



3.1.5. ábra: A fluxus-eloszlások grafikonja DLM2 és PE esetén [102]

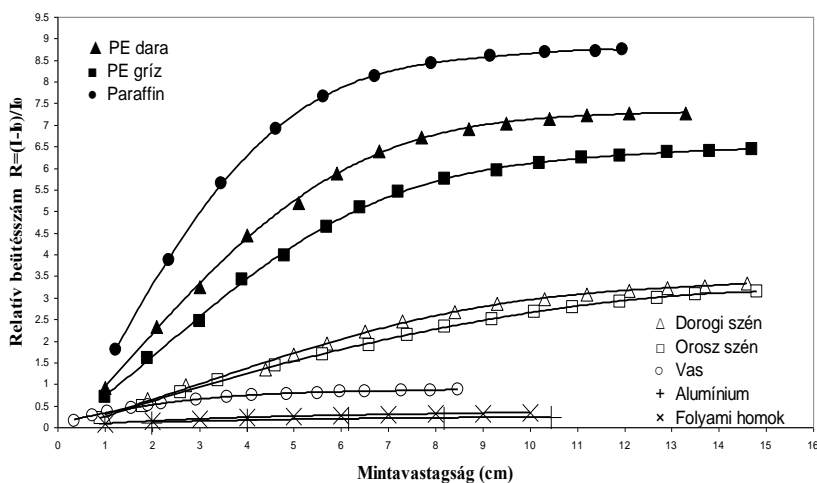


3.1.6. ábra: Homokkörnyezetbe rejtett DLM2 mintával kapcsolatos mérések [43]

Az R relatív beütésszám, mint a homokreflektor szimmetriatengelyében elhelyezkedő DLM2 és a detektor távolságának függvénye, azt mutatja, hogy a DLM2 kimutathatósági távolságának maximuma ~ 8 cm, ami összhangban van a korábbi vizsgálatokkal [60]. Méréseket végeztünk üres (DLM2 nélküli) folyamihomok-reflektorral is, annak megállapítására, hogy a különböző vastagságú közeghez mekkora relatív beütésszámok

tartoznak. A 3.1.6. ábrán látható: ha a detektor és a minta közötti homokréteg vastagsága több mint 8-10cm, akkor a DLM2 hatását már nem tudjuk elkülöníteni a háttértől. Megjegyzés: ez azt jelenti, hogy ha a bomba több mint 10 cm mélyen van, akkor ezzel a módszerrel nem lehet észlelni a robbanóanyagot [102].

Az összehasonlíthatóság érdekében más anyagokat is használtunk reflektorként, a folyami homokon kívül, és kiszámoltuk az R és a reflektorvastagság közötti kapcsolatot. Ezeknél a méréseknél nem használtuk a DLM2 mintát. Az eredményeket ábrázolva láthatjuk, hogy ~8cm-es vastagságnál minden esetben elértük a telítési vastagságot (3.1.7. ábra) [102].



3.1.7. ábra: Különböző minták telítési görbéje [102]

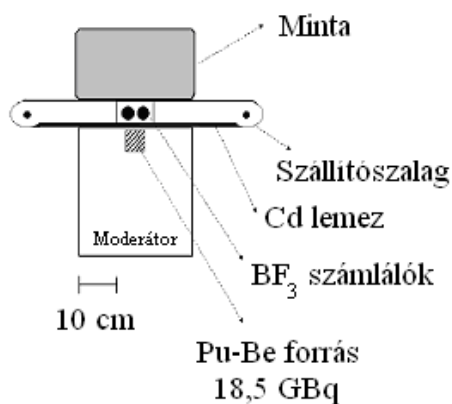
Az ETNA és a BITATRON (lásd a következő alfejezetben a részletesebb leírását) mérőrendszerekkel kapott 8cm-es mintavastagságra vonatkozó R értékek összehasonlítását mutatja be a 3.1.1. táblázat. Az eredmények szerint az ETNA módszerrel, Cd lap használata mellett, hidrogén tartalmú minták esetén, a relatív beütésszámok telítési értékei egy kettes faktossal nagyobbak lesznek, mint a BITATRON alkalmazásával [102].

Az R értékeire 1,2, 0,8, ill. 0,7 adatot kaptunk az ETNA-val való kísérlet során, amikor PE-t, melamin, ill. ammónium-nitrátot (37, 14, ill. 24g H) rejtő, 1,2kg tömegű papírreflektort vizsgáltunk. A papír helyett 0,55kg textilanyagot használva pedig ugyanezen adatokra 1, 0,4, ill. 0,5 értékeket nyertünk. Ebből látható, hogy a hidrogéntartalmú plasztik robbanószerkezet kimutatása ilyen körülmények között nehéz, amit az a tény

is bonyolultabbá tesz, hogy a különféle papírok és ruhaanyagok kémiai összetétele nem egyezik meg [102]. A tiltott és veszélyes anyagok kimutathatósága ilyen környezet esetén azért fontos, mert pl. a repülőtereken a csomagok vizsgálata során ezeknek a módszereknek a megbízhatóságát bizonytalanná teheti. Az ETNA rendszer és egy szállítószalag kombinációját mutatja be 3.1.8. ábra [43].

3.1.1. táblázat: Az R értékek összehasonlítása a BITATRON és az ETNA mérési geometriák esetén [102]

Minták	BITATRON	ETNA	ETNA
	Cd nélkül	Cd-mal	Cd nélkül
CH ₂ dara	2,71	6,97	2,85
CH ₂ lapok	-----	8,54	3,32
Paraffin	3,77	6,72	2,59
Víz	4,62	7,79	3,11
Plexi	3,17	7,42	3,19
Hungarocell	0,04	0,02	0,08
Dorogi szén	1,31	2,54	1,6
Orosz szén	1,19	2,28	1,57
Zeolit	0,44	0,56	0,69
Vas	0,67	0,82	0,88
Aluminium	0,14	0,21	0,28
Grafit	0,62	0,69	1,01
DLM	2,71	0,67	0,43
DLM+Homok	0,69	1,19	0,89
Homok	0,27	0,32	0,5
SiO ₂	0,28	0,54	0,44



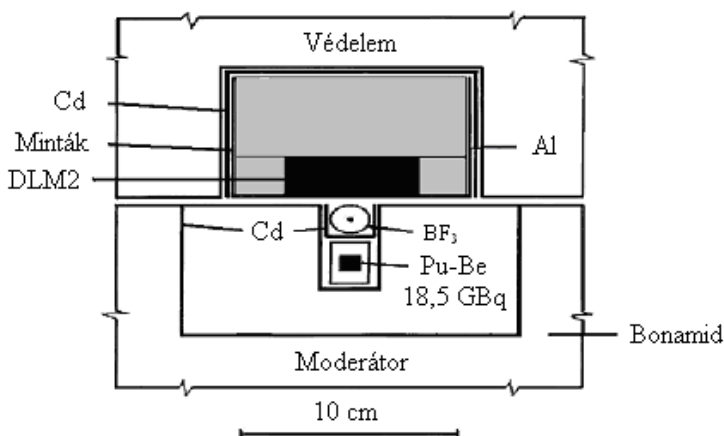
3.1.8. ábra: Az ETNA módszer szállítószalaggal kiegészítve [43]

3.2. Összehasonlító mérések reflexiós és aktivációs módszerrel

Debrecenben, az 1970-es években, üzembe helyezett BITATRON mérőrendszer még mindig megfelelő pontosságú (0,1% H) adatokat szolgáltat a hidrogén tartalom meghatározására komplex összetételű minták esetén is. Az eszközt azért fejlesztették ki, hogy aszfalt minták bitumen tartalmát lehessen vizsgálni termikus neutronok reflexiójával (lásd a 2.4. alfejezet 1. pontját és a [37] irodalmat). A BITATRON-nal különböző vastagságú minták (pl. különböző olajok, szénhidrogének, fémötvözetek, szerves- és szervetlen vegyületek) H tartalmát lehet meghatározni. A neutronokat a moderátorba helyezett 18,5GBq aktivitású Pu-Be forrás szolgáltatja. A reflektált neutronok beütésszámát egy 1,8cm átmérőjű és 8cm hosszúságú, henger alakú BF₃ számlálóval mérhetjük. Mintatartóként henger alakú, 8cm mélységű, 10,2cm átmérőjű, Cd bevonású, Al dobozt használtunk. Így a reflektorok átmérője összevethető a számláló érzékeny térfogatának méreteivel és a Dy, ill. In fóliákkal a moderátor szabad felszínén elvégzett síkbeli fluxuseloszlás-mérések FWHM értékeivel [103,104]. A BITATRON mérőrendszert mutatják be a 3.2.1. és a 3.2.2. ábrák.



3.2.1. ábra: A BITATRON mérőrendszer egységei



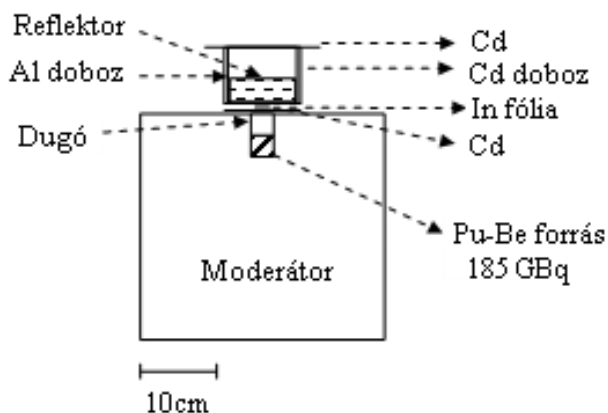
3.2.2. ábra: A BITATRON mérési összeállítása [105]

Aktivációs fóliákkal elvégzett, fluxuselozlás-méréseknél használt mérési összeállítást mutatnak be a 3.2.3. és a 3.2.4. ábrák. Ennél a mérési módszernél 185GBq aktivitású Pu-Be neutronforrást alkalmaztunk, amelyet egy henger alakú bonamid moderátor függőleges szimmetriatengelyében helyeztünk el, a felszín alatt 4cm-es mélységben (majd egy kisméretű bonamid dugóval zártuk le). A Cd borítású mintatartót a moderátor szabad felszínére helyeztük. Az ETNA összeállítással ellentétben nem a moderátor teljes felszínét fedtük le Cd lappal, csak a mintának megfelelő nagyságú részt. Megjegyzés: ennél a mérési sorozatnál ugyanazt a bonamid moderátort használtuk, amelyet az ETNA mérési összeállításnál alkalmaztunk, a mintatartó pedig majdnem ugyanolyan paraméterekkel rendelkezett, mint a BITATRON mérőedénye. A moderátor szabad felszínén az epitermikus neutronok síkbeli fluxus-eloszlásának az FWHM értéke $\sim 12\text{cm}$, amely összemérhető a reflektor anyagának átmérőjével. Aktivációs detektorként $1,9\text{cm}$ átmérőjű és $0,01\text{cm}$ vastagságú In fóliákat használtunk, amelyeket a mintatartó edény és a bonamidfelszínre helyezett Cd lap közé raktunk. Ez az összeállítás, a $\sim 0,55\text{eV}$ „Cd cut-off” energia figyelembevétele mellett, lehetőséget adott az $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{In}^m$ reakció vizsgálatára is. A keletkező ^{116m}In izotóp béta-aktivitását (felezési idő $\sim 54,3\text{perc}$) egy végablakos GM számlálóval mértük, 50perc aktiválási, 14perc hűlési- és 50perc mérési időket választva. A többi reakció járuléka a béta-aktivitáshoz, ilyen időintervallumok választása mellett, elhanyagolható. A ^{116m}In aktivitását főként az $1,45\text{eV}$ -os rezonancia neutronok fluxusalbedója okozza. Ugyanezzel a mérési geometriával később megvizsgáltuk a

$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ (kiszámú) reakcióhoz tartozó 4,9eV energiájú rezonancia neutronok hatását is [103,104].



3.2.3. ábra: Az aktivációs mérésnél használt moderátor mintatartó edénnyel és reflektor anyaggal



3.2.4. ábra: Mérési összeállítás rezonancia neutronok vizsgálatára [103]

Ebben a kísérlet-sorozatban az volt a célunk, hogy a tiltott anyagok vizsgálatához szükséges alapvető reflektoranyagokat megvizsgáljuk reflexiós és aktivációs módszerrel is. (A grafitot, mint tiszta szén C, a paraffint a C + H, a vizet a H + O és az ammónium-nitrátot a N tartalma miatt.) Egy egyszerű analitikus formulát is kerestünk a relatív beütésszám reflektorvastagságtól való függésének leírására [103].

A relatív beütésszámot, $R(z)=[I(z)-I_0]/I_0$, a z mintavastagság függvényében határoztuk meg különböző elemekre és vegyületekre (ahol $I(z)$, ill. I_0 a reflektorral, ill. reflektor nélkül mért beütésszám). Az $R(z)$ függvény értékei arányosak az azonos részecskék cm^3 -enkénti számával és a σ_β reflexiós hatáskeresztmetszetükkel (lásd: a 2.4. alfejezet 9. pontját és a [66] irodalmat).

$$R(z) = CN\sigma_\beta z \quad (3.2.1.)$$

ahol N , ill. z a részecskék száma cm^3 -enként, ill. a reflektor vastagsága cm -ben. Látható, hogy az $R(z)$ értéke a reflektor felszínének 1cm^2 felületéről reflektálódott neutronok számával arányos. Megjegyzés: a 3.2.1. egyenletbe azért írtuk be a C konstanst, hogy a σ_β adatot barn egységben kapjuk meg. (Értéke: 10^{-24}cm^2 .) Az egyenlet azt feltételezi, hogy a neutronok a reflektor rétegein gyengülés nélkül haladnak át, azonban ebben a kísérletben a reflektor teljes vastagságát vizsgálva már elértük a reflektált neutronokra vonatkozó telítési értéket [103]. (Ezt mutatják be a 3.2.5. és a 3.2.6. ábrák.)

Az In fóliák aktivitása és a mért beütésszámok kapcsolatban vannak az elnyelt (n) és az összes beeső (n_0) neutrons szám arányával:

$$n/n_0 = \exp(-N\sigma_\beta z) \quad (3.2.2.)$$

Ebben az egyenletben a neutronok már áthaladnak a reflektor teljes, z , vastagságán. A neutronreflexió valószínűsége:

$$(n-n_0)/n_0 = [1-\exp(-N\sigma_\beta z)] \quad (3.2.3.)$$

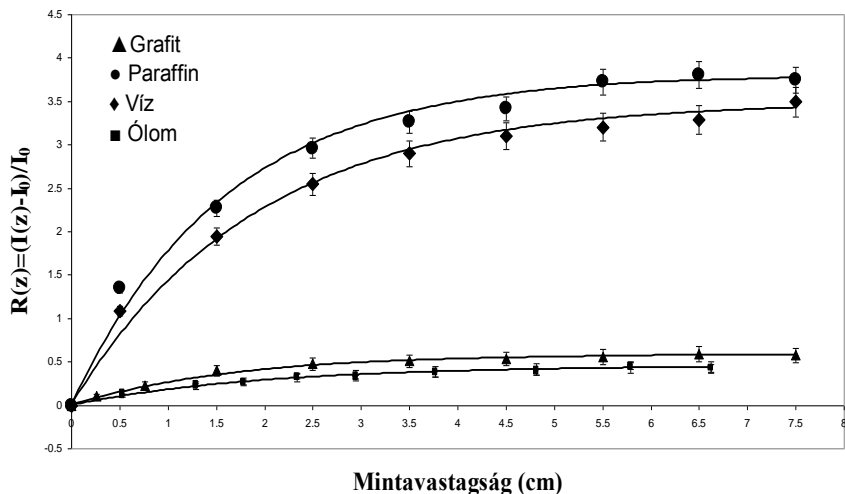
Így a reflektált neutronok által okozott aktivitás-, ill. beütésszám növekmény megadható a z függvényeként.

$$R(z) = R_0[1-\exp(-N\sigma_\beta z)] = R_0[1-\exp(-\Sigma_\beta z)] \quad (3.2.4.)$$

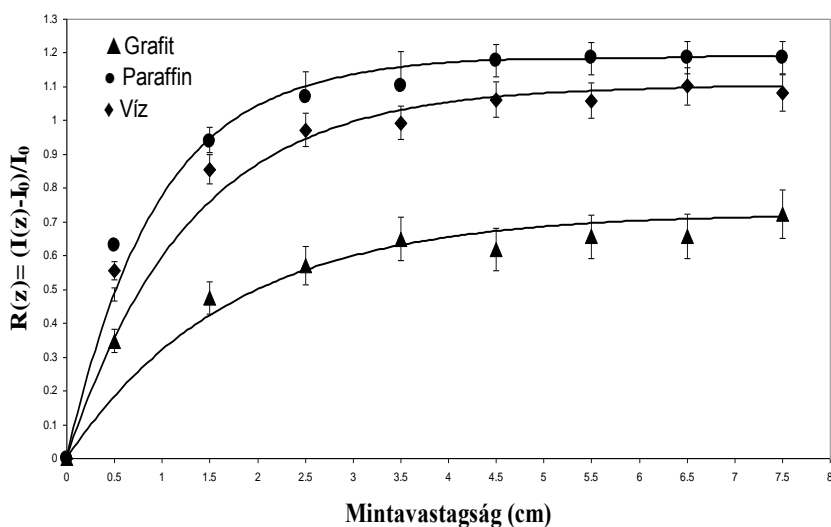
ahol Σ_β a neutronok makroszkopikus reflexiós hatáskeresztmetszete a vizsgált reflektoranyagra vonatkoztatva. A Σ_β értékeit az $R(z)$ függvény meghatározásához szükséges kísérleti adatokból számoltuk ki [103].

A következő két ábrán látható, a termikus és a rezonancia neutronokra mért $R(z)$ függvényeket, a 3.2.4. egyenlettel közelítettük a különböző elemekre és vegyületekre. Érdeemes megjegyezni, hogy a BITATRON eszközzel elvégzett mérés esetén a mérési pontok hibája $\sim 10\%$, míg a rezonancia-neutronokkal végzett vizsgálatnál a statisztikus hiba $\sim 15\%$. A

reflektoranyagok tömegét, sűrűségét és a kísérletek segítségével kapott jellemzőiket tartalmazza a 3.2.1. táblázat, ahol az A, ill. B betűk az aktivációs, ill. a BITATRON méréssel kapcsolatos adatot jelentik [103].



3.2.5. ábra: Az $R(z)$ értékek függése a reflektorvastagságtól rezonancia-neutronok (aktivációs módszer) esetén [103]



3.2.6. ábra: Az $R(z)$ értékek függése a reflektorvastagságtól termikus neutronok (BITATRON-os módszer) esetén [103]

3.2.1. táblázat: Mérési eredmények az $R(z)$ függvényekre vonatkozóan [103]

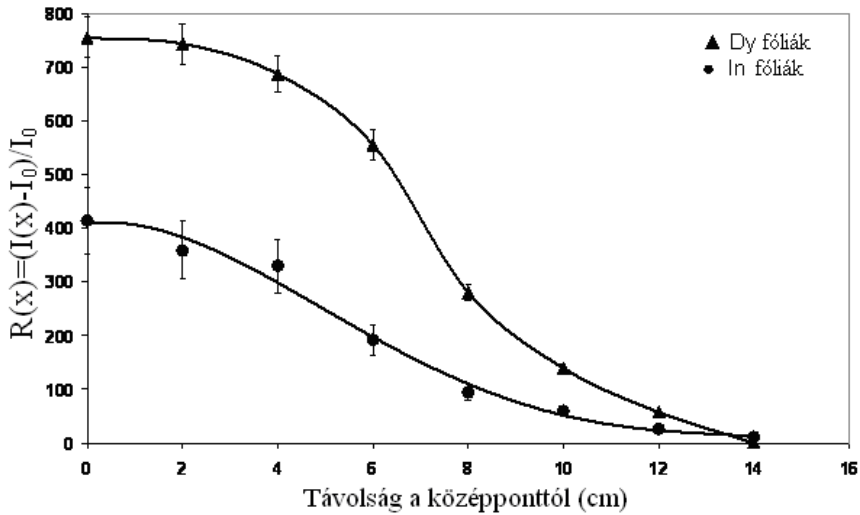
Reflektor	Σ_β	R_0	R_i	Tömeg (g)	Sűrűség (g/cm ³)
Grafit (B)	0,6	0,59	1,5	1090	1,66
Grafit (A)	0,58	0,72	0,4		
Paraffin (B)	0,63	3,81	1,7	560	0,87
Paraffin (A)	1,05	1,19	0,6		
H ₂ O (B)	0,53	3,49	1,6	648	1,0
H ₂ O (A)	0,78	1,1	0,5		
Zeolit (B)	0,69	0,51	0,25	648	0,98
Cukor (B)	0,52	2,22	1	607	0,96
Acél (B)	1,07	0,59	0,27	4465	7,79
Ólom (B)	0,51	0,46	0,19	6128	10,58

A táblázatban megadtuk a vizsgált reflektorokra vonatkozó $R(z)$ függvényekkel kapcsolatos adatokat: a Σ_β , R_0 és R_i értékeket, ahol R_i -vel azt a pontot jelöltük, ahol a függvény menete megváltozik (az addigi közel lineárishoz képest). Fontos megjegyezni, hogy ezek az eredmények nem egzaktak, függenek a reflektorok elemi összetételétől és a mérési geometriától. Látható, hogy Σ_β értékei grafit esetén megegyeznek a két módszerre vonatkoztatva, de paraffin és víz mintáknál az aktivációs módszer nagyobb értéket ad. Az R_0 értékek összehasonlítása is azt mutatja, hogy a kétféle módszerrel kapott adatok jelentősen különböznek. Megjegyzés: az aktivációs módszer időigényesebb és kevésbé érzékeny a BITATRON alkalmazásához viszonyítva [103].

A keresett $R(z)$ függvények alakját a 3.2.4. egyenlettel írhatjuk le mindkét mérési módszer esetén. A függvény megegyezik az exponenciális eloszlás eloszlás-függvényével (csak az R_0 együtthatóval van transzformálva), amelynek értéke nulla, ha $z < 0$, egyébként pedig $1 - \exp(-\lambda z)$, $\lambda = \Sigma_\beta$ paraméter-választás mellett [106].

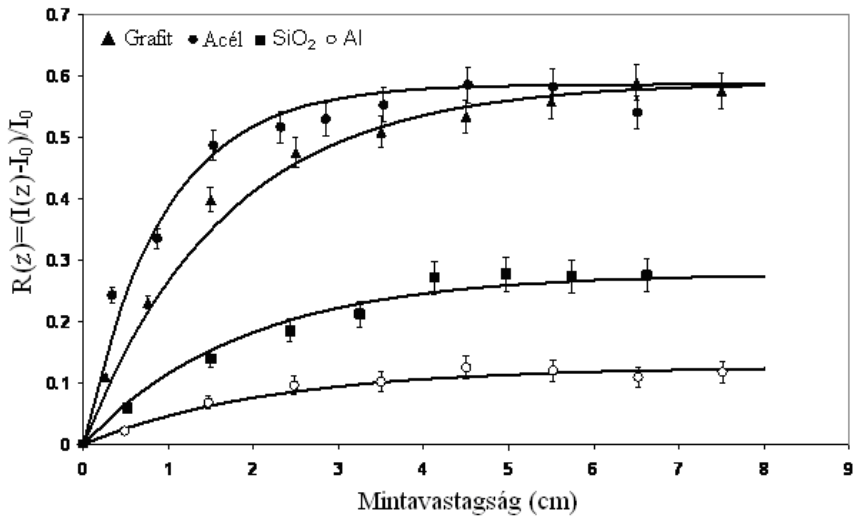
Az aktivációs fóliákon, ill. a BITATRON-on alapuló mérési összeállítást felhasználtuk még egy kísérletsorozat kivitelezésére. A mérési körülményeken és geometrián nem változtattunk, de kiszélesítettük a megvizsgált minták körét. Célunk volt a különféle reflektoranyagokra vonatkozó $R(z)$ függvények meghatározásán kívül az is, hogy a mérési eredményekből visszszámoljuk a mintákra vonatkozó σ_β mikroszkopikus hatáskeresztmetszeteket. Meghatároztuk a C, O, H és N atomokra vonatkozó σ_β értékeket, majd az addíciós formula segítségével a molekulákra vonatkoztatott $\sigma_{\beta\text{mol}}$ hatáskeresztmetszet adatokat (kábitószerek, robbanóanyagok és fedőanyagok esetén).

Megmértük a bonamid moderátor szabad felszínén Dy és In aktivációs fóliákkal a síkbeli fluxus-eloszlást is [104]. Lásd: a 3.2.7. ábrát.

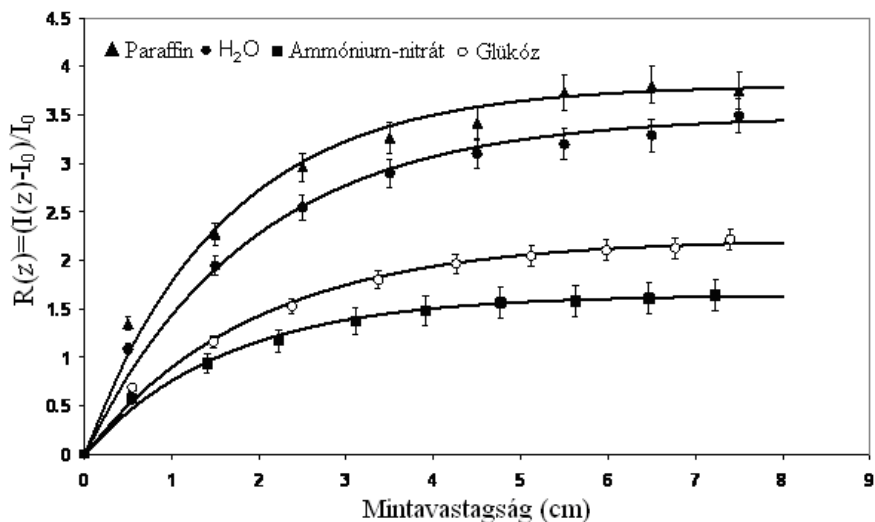


3.2.7. ábra: Fluxus-eloszlás a moderátor szabad felszínén [104]

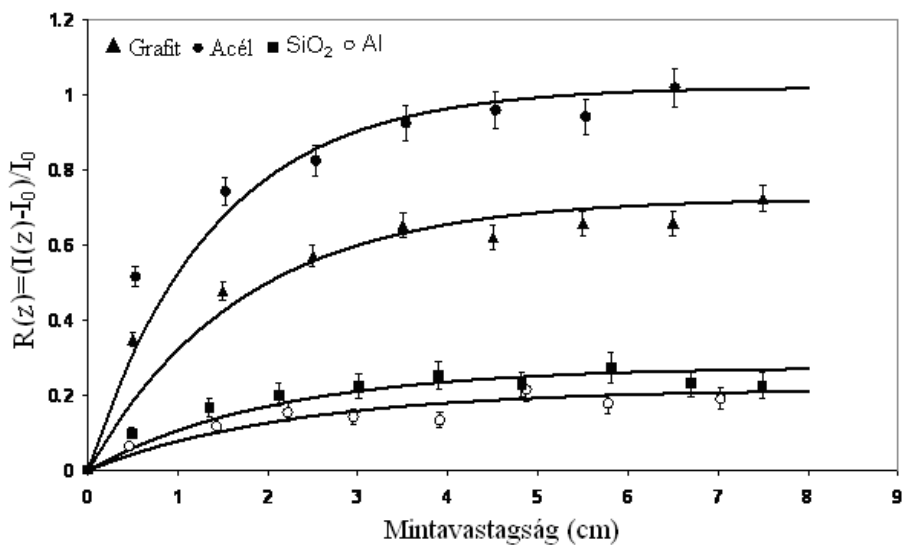
A következő négy ábra mutatja be a kapott $R(z)$ függvényeket H tartalom nélküli (grafit, acél, SiO_2 , Al) ill. H-es minták esetén (paraffin, víz, ammónium-nitrát, glükóz) mindkét módszer felhasználásával [104].



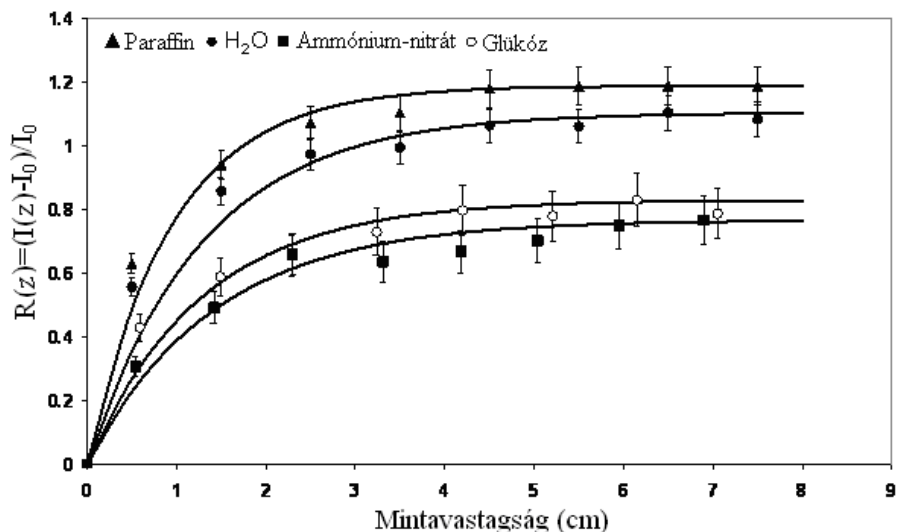
3.2.8. ábra: $R(z)$ függvények BITATRON módszerrel H nélküli mintákra [104]



3.2.9. ábra: $R(z)$ függvények BITATRON módszerrel H tartalmú mintákra [104]



3.2.10. ábra: $R(z)$ függvények aktivációs méréssel H nélküli mintákra [104]



3.2.11. ábra: $R(z)$ függvények aktivációs méréssel H tartalmú mintákra [104]

A 3.2.2. táblázat mutatja be a vizsgált reflektoranyagokat és a rájuk jellemző R_0 , Σ_β , σ_β értékeket. A táblázat fejlécében szereplő BITATRON, ill. Aktiváció feliratok az alkalmazott módszerre utalnak. Mindkét esetben azonos mintavastagságot és reflektortérfogatot vizsgáltunk [104].

3.2.2. táblázat: R_0 , Σ_β , σ_β értékek különböző reflektoranyagok esetén [104]

Reflektor	BITATRON			Aktiváció		
	R_0	Σ_β	σ_β	R_0	Σ_β	σ_β
Grafit	0,59	0,6	0,92	0,72	0,58	1,2
CH ₂	3,8	0,63	13	1,2	1,1	4,2
H ₂ O	3,5	0,53	14	1,1	0,78	4,3
C ₆ H ₁₂ O ₆	2,2	0,52	89	0,83	0,78	33
NH ₄ NO ₃	1,6	0,62	29	0,77	0,7	14
C ₂ H ₅ OH	3,3	0,7	42	1,1	0,94	14
C ₂ H ₃ Cl	1,1	0,93	12	0,94	0,88	10
Acél	0,59	1,1	1,2	1	0,72	2,3
Pb	0,46	0,51	2,1	0,56	0,64	2,7
Al	0,13	0,46	0,27	0,22	0,44	0,46
SiO ₂	0,28	0,53	2,5	0,28	0,48	2

Az $R(z)$ függvényekre jellemző, számított R_0 és Σ_β értékek nem egzaktak, az adatok a reflektorok pontos összetételétől és a mérés körülményeitől is függenek. A 3.2.2. táblázatban megadott, az adott

reflektorra jellemző Σ_{β} értékek a kiterjedt minta egészére vett átlagos adatok, azaz reprezentatív értékek. A 3.2.4. egyenlettel a BITATRON és az aktivációs módszerrel is jól lehet közelíteni (hibahatáron belül) a kísérleti adatokat. Az R_0 értékek összehasonlítása azt mutatja, hogy a termikus, ill. rezonancia neutronok esetén szignifikánsan eltérőek az eredmények még ugyanazon reflektor esetén is. A 3.2.2. és a 3.2.3. táblázatokban található glükóz és etil-alkohol molekulákra vonatkozó, kísérletből kapott, $\sigma_{\beta\text{mol}}$ értékek jó egyezést mutatnak a számított értékekkel, ha az addíciós formulában: $\sigma_{\beta\text{mol}}(Z) = \sum_i n_i \sigma_{\beta i}(Z) = R/CN_{\text{mol}}Z$ (lásd később a 3.3.2. egyenletet) ugyanazokat a σ_{β} adatokat alkalmazzuk a H, C és O atommagokra. A 3.2.3. táblázat kábítószerre, robbanóanyagokra és fedőanyagokra (vagyis olyan anyagokra, amelyekben elrejtik a tiltott anyagokat) vonatkozó, ugyanazon $\sigma_{\beta}(\text{H})$, $\sigma_{\beta}(\text{C})$, $\sigma_{\beta}(\text{O})$, $\sigma_{\beta}(\text{N})$ adatok segítségével kiszámolt, (kerekített) értékeket tartalmaz (lásd a 3.2.4. táblázatot). Ebben a táblázatban található adatokból jól látszik, hogy a molekulákra vonatkozó $\sigma_{\beta\text{mol}}$ értékek eléggé eltérőek, ha a drogokat összehasonlítjuk a robbanó-, ill. fedőanyagokkal. Megjegyzés: ez azt jelenti, hogy a kábítószereket könnyebben el tudjuk különíteni a rejtő anyagoktól ezzel a módszerrel. A robbanószer kimutatásához a nitrogénre vonatkozó hatáskeresztmetszet pontos meghatározása szükséges (lásd később) [104].

3.2.3. táblázat: A $\sigma_{\beta\text{mol}}$ értékek összehasonlítása tiltott-, ill. fedőanyagok esetén [104]

Reflektor	BITATRON Aktiváció	
	$\sigma_{\beta\text{mol}}$	$\sigma_{\beta\text{mol}}$
Kokain ($\text{C}_{17}\text{H}_{21}\text{NO}_4$)	155	59
Morfin ($\text{C}_{17}\text{H}_{19}\text{NO}_3$)	141	55
Heroin ($\text{C}_{21}\text{H}_{23}\text{NO}_5$)	173	68
LSD ($\text{C}_{20}\text{H}_{25}\text{N}_3\text{O}$)	183	69
Nitroglicerín ($\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$)	55	29
PETN ($\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$)	82	42
TNT ($\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$)	54	30
Tetrit ($\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_5\text{O}_8$)	62	36
Ammónium-nitrát műtrágya	34	14
Glükóz ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)	89	33
Szaharóz ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$)	164	61
Metil-alkohol (CH_3OH)	27	8,5
Etil-alkohol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	41	13
Polietilén (CH_2)	13	4,2
Hungarocell (C_8H_8)	57	22
Melamin ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$)	56	26

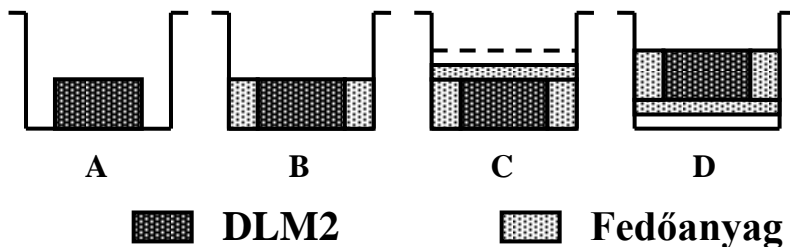
3.2.4. táblázat: σ_{β} adatok BITATRON (B) és aktivációs (A) módszer esetén [104]

Reflektor	σ_{β} (barn)	Reflektor	σ_{β} (barn)
C (B)	0,921	C (A)	1,159
H (B)	6,233	H (A)	1,537
N(B)	2,56	N (A)	2,156
O (B)	1,471	O (A)	1,239

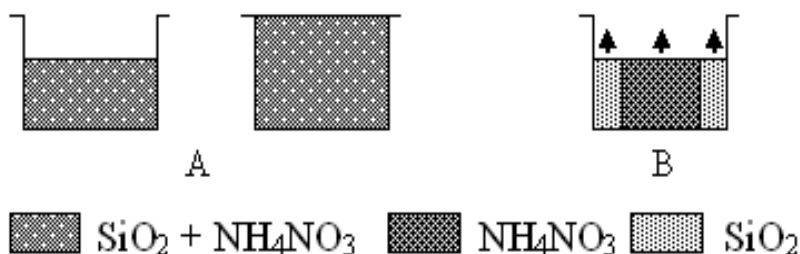
3.3. A BITATRON mérési összeállítással végzett további vizsgálatok

A korábbi adatsorok pontosítása céljából a BITATRON mérési geometriával végeztünk újabb méréseket. A célunk az volt, hogy a $\sigma_{\beta}(\text{H})$, $\sigma_{\beta}(\text{C})$, $\sigma_{\beta}(\text{O})$, $\sigma_{\beta}(\text{N})$ értékek reflektorvastagságtól való függését meghatározzuk és megadjuk ezeknek a függvényeknek a kapcsolatát a megmért $R(z)$ függvényekkel. Kiszámoltuk a $\sigma_{\beta\text{mol}}$ értékeket, a molekulákra vonatkozó hatáskeresztmetszeteket is. Az első kísérletsorozatban NH_4NO_3 tartalmú műtrágyát vizsgáltunk, a nitrogénre vonatkozó adatok miatt. (Megjegyzés: a vizsgált műtrágyában az összes N tartalom 34%-os, amely fele-fele részben tartalmaz ammóniumionból (NH_4^+) és nitrátióból (NO_3^-) származó nitrogént.) Az ammónium-nitrát vizsgálatának több oka van: 1. Grafít, CH_2 és H_2O méréséből a N-re vonatkozó adatra vissza tudunk következtetni. 2. Ilyen műtrágyát könnyen be lehet szerezni bármelyik mezőgazdasági boltban. 3. Könnyű belőle robbanóanyagot gyártani. Mértünk DLM2 mintával is és megvizsgáltuk, hogy a különböző fedőanyagok (SiO_2 , CH_2 , zeolit) hogyan változtatják meg a kimutathatóságát [105].

Ebben a kísérletsorozatban a kimutatandó robbanóanyagot a DLM2 mintával és az NH_4NO_3 műtrágyával szimuláltuk. A BITATRON (részletesebb leírását lásd az előző alfejezetben) edényének átmérője $\sim 10\text{cm}$, a mélysége pedig $\sim 8\text{cm}$, így maximálisan $\sim 650\text{cm}^3$ térfogatú mintát vagy minta+fedőanyag keveréket tudunk bele helyezni. A DLM2 mintát Fokvárosban készítették Brooks és munkatársai NAÜ együttműködés keretében (lásd 2.4. alfejezet 6. pontját és [51] irodalmat). A bombautánczat egy 94,2g tömegű, 8cm átmérőjű, 3,4cm magasságú plexi dobozban található ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$). A belső rész (ami TNT-t szimulál) egy keverék: 23,8g oxálsav ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$), 58,5g cianursav ($\text{C}_3\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_3$) és 17,25g grafít. A DLM2-t úgy készítették, hogy a mérete nagyjából megegyezzen egy tipikus taposóakna plasztik töltetével. A fedőanyagok DLM2-re vonatkozó árnyékoló hatását a 3.3.1. ábrán látható geometriában mértük meg. A D jelű ábrán lévő elhelyezésben csak zeolitot használtunk rejtőanyagként $2 \times 1\text{cm}$ -es rétegben a DLM2 alatt [105].

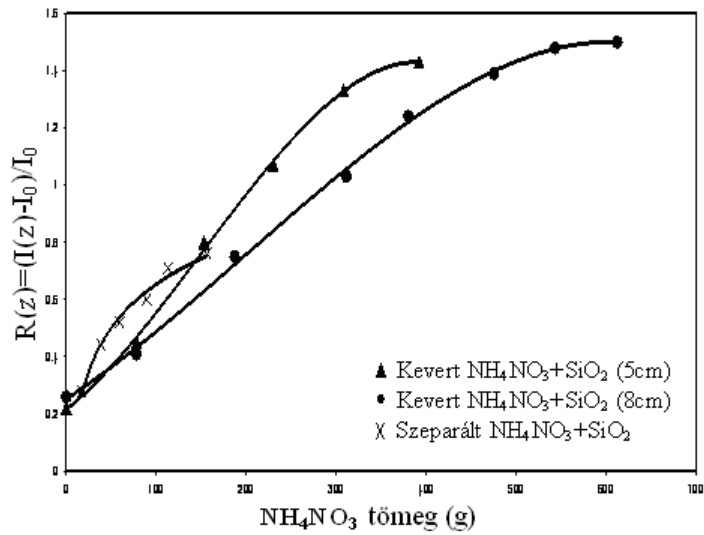


3.3.1. ábra: A DLM2 és a fedőanyagok egymáshoz viszonyított helyzete [105]

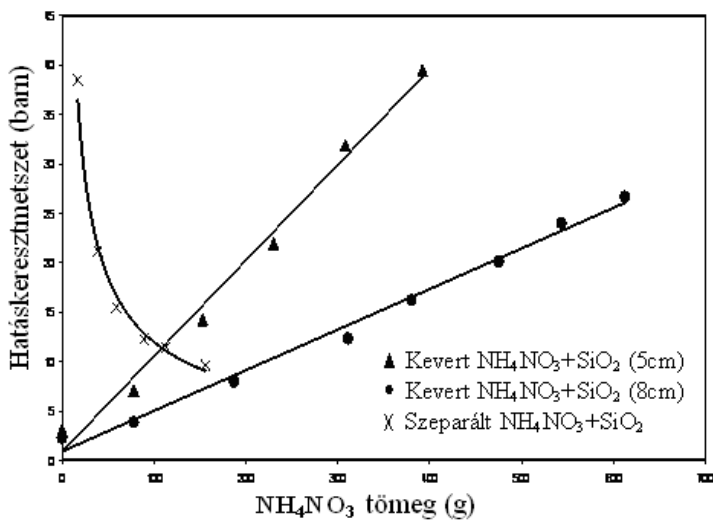


3.3.2. ábra: Összekevert, ill. elkülönített NH_4NO_3 és SiO_2 minták [105]

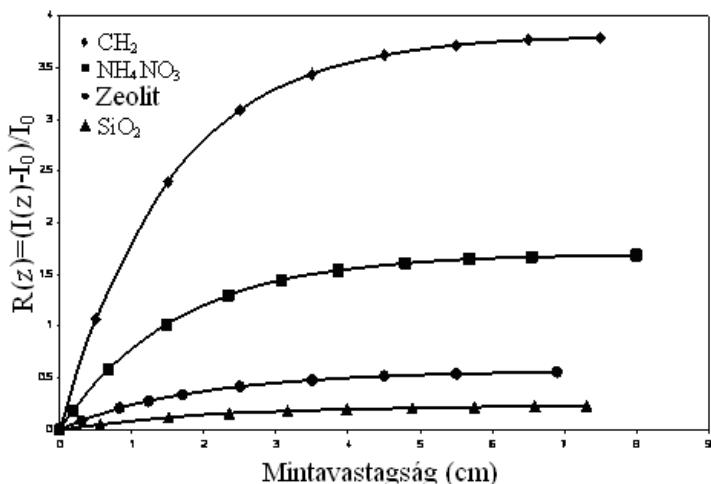
A BITATRON rendszerrel vizsgáltuk meg az ammónium-nitrát hatását is, 5cm és 8cm mintavastagság mellett. A két minta eltérő mennyiségben tartalmazott ammónium-nitrát műtrágyát, amelyet egyenletesen elkevertünk szárított kvarchomokban (lásd a 3.3.2. A ábrát). A 3.3.2. B ábrán látható elrendezésben az NH_4NO_3 -ot és a homokot egy fémlappal elkülönítettük egymástól. Ebben az esetben az $R(z)$ függvényeket különböző mintavastagságokra határoztuk meg (1-8cm intervallumban). A közepén lévő ammónium-nitrát mag kisebb átmérőjű volt (~6cm), mint a DLM2 mérete. A reflektált neutronokból származó hozamot lemértük külön-külön a magra és az 5cm, ill. 8cm mintavastagságra. Az R , ill. a σ_B ammónium-nitrát mennyiségétől való függését mutatják be a 3.3.3. és a 3.3.4. ábrák és a 3.3.1. táblázat alsó része [105].



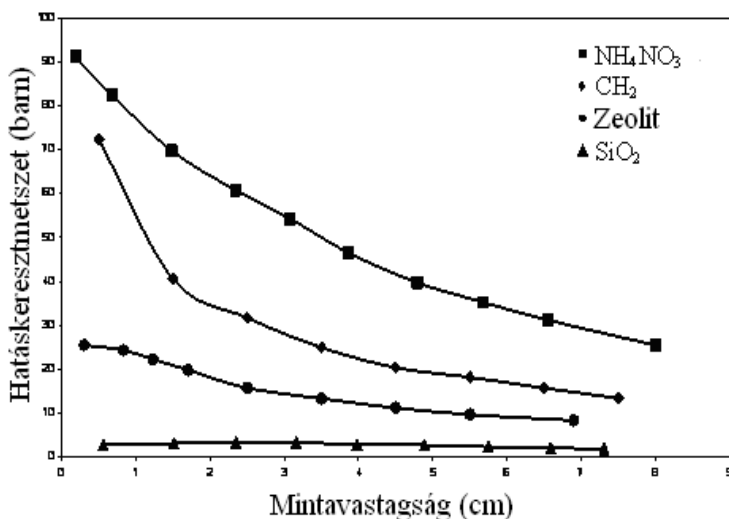
3.3.3. ábra: A mért relatív beütésszám az NH_4NO_3 tömegének függvényében [105]



3.3.4. ábra: A számított hatóskeresztmetszet értékek az NH_4NO_3 tömegének függvényében [105]



3.3.5. ábra: A relatív beütésszám mintavastagságtól való függése fedőanyagok és NH₄NO₃ esetén [105]



3.3.6. ábra: A hatáskeresztmetszet mintavastagságtól való függése fedőanyagok és NH₄NO₃ esetén [105]

Az R , ill. a σ_{β} értékeket lemértük, ill. kiszámoltuk különböző reflektoranyagokra, amelyek nagysága megegyezett a DLM2 méretével (K), ill. a tárolóedényével (N) (lásd: 3.3.1. B ábra). A kapott eredményeket tartalmazza a 3.3.2. táblázat. Kimértük fedőanyagok, ill. ammónium-nitrát esetén az $R(z)$ és a $\sigma_{\beta}(z)$ függvényeket is (lásd a 3.3.5. és a 3.3.6. ábrákat) [105].

Ebben a kísérletsorozatban is az R , σ_β és Σ_β értékek segítségével jellemeztük a tiltott-, ill. rejtőanyagok szerepét a mért reflektált neutronok hozamának kialakításában. A σ_β és Σ_β adatok a kiterjedt minta egészére vonatkozó átlagos értékek, amelyek kiszámításánál figyelembe vettük a reflektorban lévő molekulák vagy atomok számát. Az $R(z)$ függvények esetében az intervallumok legkisebb és legnagyobb értékeit adtuk meg és a hatáskeresztmetszet értékekkel együtt feltüntettük őket a 3.3.1. táblázatban [105].

A következő következtetésekre jutottunk a mérési eredményekkel kapcsolatban [105]:

1. A neutronok hozamához tartozó makroszkopikus- (Σ_β) és mikroszkopikus (σ_β) visszaszórási hatáskeresztmetszetek legnagyobb értékét a magányos DLM2 esetén mértük (3.3.1. A ábra), bár kivétel volt a zeolit esete (3.3.1. B ábra).
2. A 3.3.1. B, ill. C ábrákon látható elrendezésben mérve a reflektált neutronok hozamában csökkenést tapasztaltunk fedőanyagok hatására. Ennek a hatásnak oka az, hogy a beeső és a reflektált neutronok száma is csökken a vizsgált anyag abszorpciója miatt.
3. A homokban elkevert NH_4NO_3 esetén a hidrogénes anyag tömegének növekedésével csak adott koncentrációig nő a beütésszám, majd telítésbe megy. Ezt tapasztaltuk 5, ill. 8 cm-es mintavastagság esetén is. (Lásd a 3.3.2. A és 3.3.3. ábrákat).
4. A szeparált helyzetű SiO_2 és NH_4NO_3 (3.3.2. B ábra) esetén a σ_β értékek csökkennek (3.3.4. ábra) a mintavastagság növekedésével. Ennek oka a termikus neutronok síkbeli fluxuseloszlása [104] és az abszorpció jelensége.
5. A 3.3.4. ábra alapján megállapítható, hogy az ammónium-nitrát hatóanyag koncentrációját növelve (összekevert SiO_2 és NH_4NO_3 esetén) a σ_β is nő, így a robbanóanyag kimutatásának valószínűsége növekszik.
6. A 3.3.5. és a 3.3.6. ábrákon jól látható az $R(z)$, ill. a $\sigma_\beta(z)$ függvények közötti kapcsolat.
7. Ha a robbanóanyagot $\sim 8\text{cm}$ -nél vastagabb talajba vagy hidrogén tartalmú anyagba rejtik el, akkor már a róla érkező jeleket nem lehet elkülöníteni a környezet hatásától (a beütésszámok telítésbe mennek). Vagyis ennél mélyebbre elásott taposóaknát nem tudunk kimutatni ezzel a módszerrel.

3.3.1. táblázat: Különböző mintákra kapott R, Σ_{β} és σ_{β} értékek [105]

Minta	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Tömeg (g)	R	Σ_{β}	σ_{β}
DLM2 (3.3.1. A ábra)	1,11	191	1,2	1,4	33,65
DLM2+SiO ₂ (3.3.1. B ábra)	1,26	353	1,31	1,43	31,38
DLM2+1cm SiO ₂ (3.3.1. C ábra)	1,32	477	1,37	1,12	24,04
DLM2+2cm SiO ₂ (3.3.1. C ábra)	1,38	609	1,35	0,91	18,37
DLM2+PE (3.3.1. B ábra)	0,92	258	1,76	1,51	30,9
DLM2+1cm PE (3.3.1. C ábra)	0,88	319	2,05	1,21	23,06
DLM2+2cm PE (3.3.1. C ábra)	0,85	377	2,14	0,99	17,91
DLM2+Zeolit (3.3.1. B ábra)	1,08	303	1,33	1,43	37,44
DLM2+1cm Zeolit (3.3.1. C ábra)	1,1	398	1,35	1,11	28,55
DLM2+2cm Zeolit (3.3.1. C ábra)	1,09	481	1,37	0,91	23,73
DLM2+1cm Zeolit (3.3.1. D ábra)	1,13	408	1,02	1,05	21
DLM2+2cm Zeolit (3.3.1. D ábra)	1,07	473	0,87	0,83	15,37
Kevért NH ₄ NO ₃ +SiO ₂ (5 cm) (3.3.2. A ábra)	1,07-1,57	392-581	0,22-1,43	0,4	3,09-39,47
Kevért NH ₄ NO ₃ +SiO ₂ (8 cm) (3.3.2. A ábra)	1,01-1,59	612-928	0,26-1,5	0,27	2,28-26,67
Szeparált NH ₄ NO ₃ +SiO ₂ (3.3.2. B ábra)	1,37-1,41	126-774	0,28-0,77	0,57	8,84-38,51
NH ₄ NO ₃ Mag (5 cm)	0,78	111	0,44	0,76	15

3.3.2. táblázat: Különböző mintákra kapott R, R(X)/R(DLM), Σ_{β} , σ_{β} , $\sigma_{\beta}(X)/\sigma_{\beta}(\text{DLM})$, R(N)/R(K) és $\sigma_{\beta}(N)/\sigma_{\beta}(K)$ értékek [105]

Minta	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Tömeg (g)	R(K)	Σ_{β}	N (1/cm ³)	$\sigma_{\beta}(K)$	Minta	R(X)/R(DLM)	$\sigma_{\beta}(X)/\sigma_{\beta}(\text{DLM})$
DLM2	1,11	191	1,05	1,36	1.043E+22	29,45	DLM2	1	1
Zeolit	0,94	160	0,3	1,01	8.355E+21	10,56	Zeolit	0,29	0,36
NH ₄ NO ₃	0,97	165	0,93	1,34	7.296E+21	37,49	NH ₄ NO ₃	0,89	1,27
SiO ₂	1,57	269	0,15	0,81	1.573E+22	2,8	SiO ₂	0,14	0,1
Homok	1,43	244	0,18	0,86	1.433E+22	3,7	Homok	0,17	0,13
NH ₄ NO ₃ +SiO ₂	1,28	219	0,5	1,16	1.161E+22	12,66	NH ₄ NO ₃ +SiO ₂	0,48	0,43
CH ₂ korong	0,8	142	1,74	1,47	3.433E+22	14,48	CH ₂ korong	1,66	0,49
CH ₂ dara	0,62	106	1,54	1,48	2.66E+22	17,03	CH ₂ dara	1,47	0,58
CH ₂ olaj	0,71	125	1,8	1,49	3.046E+22	16,88	CH ₂ olaj	1,71	0,57
H ₂ O	0,88	150	1,69	1,51	2.94E+22	16,91	H ₂ O	1,61	0,57
C ₆ H ₁₂ O ₆	0,92	158	1,09	1,38	3.074E+21	104,28	C ₆ H ₁₂ O ₆	1,04	3,54
Fe	7,58	1327	0,39	1,09	8.175E+22	1,4	Fe	0,37	0,05
Cu	8,65	1477	0,26	0,97	8.194E+22	0,93	Cu	0,25	0,03
Pb	10,95	1951	0,27	0,95	3.181E+22	2,45	Pb	0,26	0,08

Minta	$\rho(\text{g/cm}^3)$	Tömeg (g)	R(N)	Σ_{β}	N (1/cm ³)	$\sigma_{\beta}(N)$	Minta	R(N)/R(K)	$\sigma_{\beta}(N)/\sigma_{\beta}(K)$
Grafít	1,67	450	0,51	1,2	8.371E+22	1,85	Zeolit	1,43	1,38
Zeolit	0,98	273	0,43	1,11	8.71E+21	14,52	NH ₄ NO ₃	1,45	1,42
NH ₄ NO ₃	0,99	274	1,35	1,44	7.446E+21	53,32	SiO ₂	1,33	1,24
SiO ₂	1,64	470	0,2	0,87	1.643E+22	3,48	Homok	1,44	1,36
Homok	1,52	421	0,26	0,97	1.523E+22	5,02	CH ₂ korong	1,53	1,53
CH ₂ korong	0,8	230	2,66	1,6	3.433E+22	22,14	CH ₂ dara	1,56	1,54
CH ₂ dara	0,63	174	2,41	1,61	2.703E+22	26,22	H ₂ O	1,73	1,49
H ₂ O	1,02	283	2,92	1,67	3.408E+22	25,2	C ₆ H ₁₂ O ₆	1,72	1,58
C ₆ H ₁₂ O ₆	1	279	1,87	1,54	3.341E+21	164,6	Pb	1,52	1,45
Pb	11,04	3245	0,41	1,04	3.208E+22	3,55			

8. A 3.3.2. táblázatban szereplő R(X)/R(DLM) értékek arra utalnak, hogy milyen az aránya a relatív beütésszámoknak, ha a DLM2 mintához tartozó értéket összehasonlítjuk egy másik anyagból készült, de vele nagyjából

megegyező méretű mintával. Az $R(N)/R(K)$ értékek pedig ugyanolyan anyagból készült DLM2 méretű, ill. mintatartó átmérőjű, de \sim DLM2 vastagságú reflektorokra vonatkoznak. (A hatáskeresztmetszet adatokra ugyanez vonatkozik.)

9. Az eredmények azt mutatják, hogy a robbanóanyagok kimutatásához együtt ajánlott használni a neutronreflexión alapuló- és a hagyományos fémdetektorokat (hand-held). Így egy adott terület szkennelésénél az aknák fém alkotórészeit és a hidrogén tartalmú összetevőit is észlelni lehet. Így a két módszer jól kiegészíti egymást [105].

A BITATRON elrendezéssel végzett újabb kísérletsorozatban az előző méréseket folytattuk és azt vizsgáltuk meg, hogy az $R(z)$ függvények segítségével hogyan lehet meghatározni a $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ mikroszkopikus és a $\Sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ makroszkopikus hatáskeresztmetszetek reflektorvastagságtól való függését különböző minták esetén. Ezekből az adatokból megadtuk a $\sigma_{\beta}(z)$ függvényeket az általunk vizsgált szerves anyagokat alkotó C, H, O, N elemekre, amely értékekből már kiszámolható bonyolultabb molekulák esetén is a hatáskeresztmetszet [107].

A 3.2.4. egyenlet szerint $R(z) = R_0[1 - \exp(-N\sigma_{\beta}z)] = R_0[1 - \exp(-\Sigma_{\beta}z)]$ képlettel lehet megadni az R relatív beütésszám és a z reflektorvastagság közötti kapcsolatot. Az egyenletben szereplő Σ_{β} a vizsgált reflektor anyagi minőségére jellemző. Σ_{β} értékeit az $R(z)$ függvények megállapításánál felhasznált kísérleti adatokból származtattuk. A 3.3.7. ábra mutatja be a méréseink által megadott $R(z)$ függvényeket. Ezeket fogadtuk el a számításainkhoz referencia adatokként az ismeretlen mintákra vonatkozó értékek megadásához. Megjegyzés: az $R(z)$ függvényeket a 3.2.4. egyenlettel közelítettük és a kísérleti adatok reprodukálhatósága a BITATRON összeállítással 10%-os hibahatáron belül van [107].

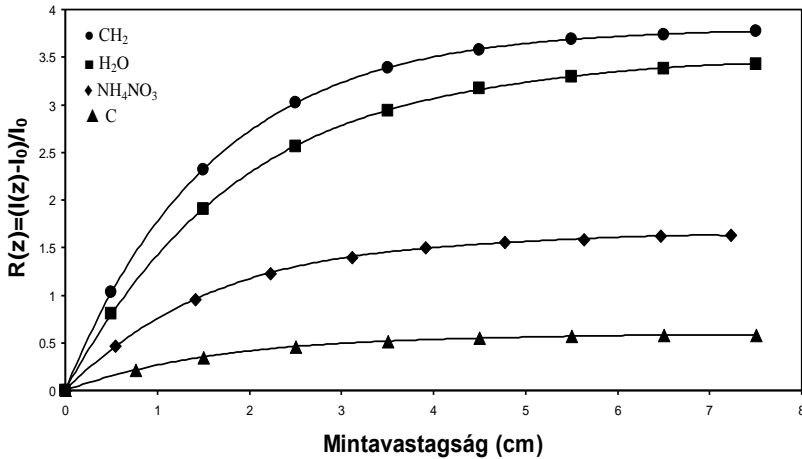
A 3.2.4. egyenlet alapján az várható, hogy a $\sigma_{\beta}(z)$ értékeknek exponenciálisan kell csökkennie a reflektorvastagság növekedésével [107]:

$$\sigma_{\beta}(z) = \sigma_{\beta}(0)\exp(-kz) \quad (3.3.1.)$$

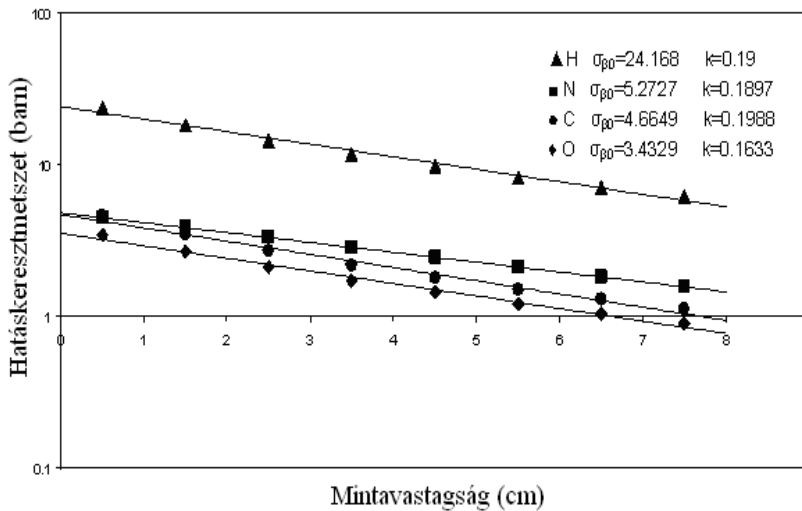
Ezzel az összefüggéssel számoltuk a referenciaként használt $\sigma_{\beta}(H)$, $\sigma_{\beta}(C)$, $\sigma_{\beta}(O)$, $\sigma_{\beta}(N)$ értékeket és ezekből az adatokból az ismeretlen anyagokra vonatkozó $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ és $R(z)$ függvényeket. A referenciaként használt $\sigma_{\beta}(z)$ függvényeket mutatja be a 3.3.8. ábra (a $\sigma_{\beta}(0)$ és k állandók feltüntetésével). A molekulákra vonatkozó $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ értékeket pedig egy egyszerű addíciós formulával kapjuk meg:

$$\sigma_{\beta\text{mol}}(z) = \sum_i n_i \sigma_{\beta i}(z) = R/CN_{\text{mol}}z \quad (3.3.2.)$$

ahol N_{mol} a molekulák száma a reflektor felszínének 1cm^2 -ére vonatkoztatva, n_i az adott molekulában lévő i típusú atomok száma, amelyeknek a hatáskeresztmetszete $\sigma_{\beta i}$ [107].



3.3.7. ábra: A referencia adatokra vonatkozó $R(z)$ függvények [107]



3.3.8. ábra: A referencia adatokra vonatkozó $\sigma_{\beta}(z)$ függvények [107]

A plastik robbanószerek és a kábítószerek fő összetevői: C, H, O és N. Az ezekre vonatkozó $R(z)$ függvények meghatározásához grafitot (C), vizet (H_2O), paraffint (CH_2) és ammónium-nitrátot (NH_4NO_3) használtunk reflektorként (lásd a 3.3.7. ábrát). Ezen kísérletek segítségével már meghatározhatók az elemekre vonatkozó $R(z)$

függvények, azokból pedig kiszámolhatók a $\sigma_{\beta}(z)$ értékek (lásd 3.3.8. ábra). A 3.3.3. táblázat tartalmazza a mért és számított függvények összevetéséből származó eredményeket (pontosabban a rájuk jellemző állandókat). A 3.2.4. egyenlet segítségével kapott R_0 és Σ_{β} értékeket használtuk fel a $\sigma_{\beta}(z)$ függvények megadásához, amelyek pedig alapul szolgáltak a $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ adatok kiszámításához a tiltott anyagok molekulái esetén. A táblázat adatai alapján visszszámoltuk az $R(z)$ függvényeket és azt kaptuk, hogy 2-6cm mintavastagság esetén a mért és a számított hozamok 10%-os hibahatáron belül megegyeznek egymással [107].

3.3.3. táblázat: Az $R(z)$ és a $\sigma_{\beta}(z)$ függvényeket jellemző paraméterek [107]

Reflektor	R_0	Σ_{β}	$\sigma_{\beta}(0)$	k
Grafit	0,59	0,6	4,1	0,21
CH ₂	3,8	0,63	61,4	0,22
H ₂ O	3,5	0,53	56,8	0,21
C ₆ H ₁₂ O ₆	2,2	0,52	246,1	0,15
NH ₄ NO ₃	1,6	0,62	91,2	0,16
C ₂ H ₅ OH	3,3	0,7	115,2	0,15
C ₂ H ₃ Cl	1,1	0,93	74,9	0,28
Acél	0,59	1,1	7,2	0,29
Pb	0,46	0,51	7,6	0,21
Al	0,13	0,46	0,8	0,14
SiO ₂	0,22	0,47	4,5	0,12
Homok	0,28	0,53	5	0,09
Zeolit	0,51	0,69	27,1	0,18

A 3.3.3. táblázatban található adatok segítségével olyan molekulákra is meg tudtuk adni az $R(z)$, ill. $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ függvények értékeit, amelyeket nem mértünk, de a molekulájuk összetétele ismert. A 3.3.4. táblázat tartalmazza ezen értékeket 2cm, 5cm és 8cm mintavastagság esetén. Fontos megjegyezni azonban, hogy a tiltott anyagok kimutatását befolyásolja az őket körülvevő fedőanyagok minősége és sűrűsége. Ezért hasznos kiegészíteni a reflexiós módszert a korábban említett „unfolding” eljárással (lásd a 2.4. alfejezet 8. pontját). A módszer érzékenysége növelhető, abban az esetben is, ha a BITATRON és az ETNA mérési elrendezéseket kombináljuk [107].

Tehát röviden összefoglalva módszerünk a következő volt:

1. Nagy tisztaságú anyagokra lemértük az $R(z)$ függvényeket. A 3.3.7. ábrán látható a referenciaanyagokként kiválasztott grafit-, polietilén-, víz-

és ammónium-nitrát műtrágya minták esetén a függvények menete. A referenciaanyagokra vonatkozó $\sigma_{\beta}(z)$ függvényeket a 3.3.1. egyenlet segítségével számoltuk ki. (Az ezzel kapcsolatos függvénymenetek láthatók a 3.3.8. ábrán.)

3.3.4. táblázat: Számított eredmények drogok, robbanóanyagok és fedőanyagok esetén [107,108, módosítva]

Reflektor	$\sigma_{\beta mol}$			R		
	2cm	5cm	8cm	2cm	5cm	8cm
Kokain (C ₁₇ H ₂₁ NO ₄)	455,12	257,2	145,17	1,63	2,76	2,59
Morfin (C ₁₇ H ₁₉ NO ₃)	416,09	234,99	132,54	1,84	3,12	2,94
Heroin (C ₂₁ H ₂₃ NO ₅)	507,99	287,05	162	1,99	3,37	3,17
LSD (C ₂₀ H ₂₅ N ₃ O)	538,05	303,6	171,07	1,8	3,05	2,87
Nikotin (C ₁₀ H ₁₄ N ₂)	296,92	167,52	94,38	1,65	2,8	2,63
Koffein (C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂)	230,64	130,38	73,6	1,29	2,18	2,05
Mentol (C ₁₀ H ₂₀ O)	400,69	226,35	127,71	2,06	3,49	3,29
Extasy (C ₁₁ H ₁₅ NO ₂)	319,96	180,76	101,99	1,65	2,79	2,62
Angyalpor (C ₁₇ H ₂₅ N)	517,04	291,72	164,37	1,92	3,25	3,05
GHB (C ₄ H ₈ O ₃)	167,27	94,83	53,71	1,74	2,96	2,8
Mefedron (C ₁₁ H ₁₅ NO)	317,27	179,11	100,98	1,62	2,74	2,57
Pentedron (C ₁₂ H ₁₇ NO)	357,07	201,58	113,65	1,69	2,86	2,68
Szintetikus fű (C ₂₄ H ₂₃ NO)	507,61	286,18	161,11	1,48	2,5	2,34
Szalvinorin A (C ₂₃ H ₂₈ O ₈)	609,86	344,97	194,91	1,66	2,81	2,65
Ammónium-nitrát (NH ₄ NO ₃)	88,69	50,57	28,81	1,73	2,96	2,81
Nitroglicerín (C ₃ H ₅ N ₃ O ₉)	137,35	78,73	45,1	0,87	1,49	1,43
PETN (C ₅ H ₈ N ₄ O ₁₂)	210,82	120,59	68,93	1,07	1,83	1,74
TNT (C ₇ H ₅ N ₃ O ₆)	143,12	81,42	46,27	0,94	1,61	1,52
Tetril (C ₇ H ₅ N ₅ O ₈)	156,44	89,22	50,83	0,84	1,44	1,37
Glükóz (C ₆ H ₁₂ O ₆)	254,94	144,72	82,08	1,99	3,4	3,21
Szaharóz (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)	470,85	267,33	151,53	1,97	3,36	3,18
Metanol (CH ₃ OH)	78,83	44,68	25,3	1,75	2,97	2,81
Etanol (C ₂ H ₅ OH)	115,45	65,35	36,93	1,8	3,05	2,88
Polietilén (CH ₂)	39,8	22,47	12,67	2,4	4,06	3,81
Hungarocell (C ₈ H ₈)	173,04	97,52	54,88	1,36	2,31	2,16
Melamin (C ₃ H ₆ N ₆)	143,22	80,91	45,63	1,61	2,73	2,57
Víz (H ₂ O)	39,03	22,21	12,63	1,96	3,34	3,17
Homok (SiO ₂)	3,87	2,59	1,74	0,1	0,21	0,23
Zeolit	19,94	11,83	7,02	0,3	0,53	0,53

2. Más vegyületekre is lemértük az $R(z)$ függvényeket és az eredményekből kiszámoltuk az anyagokra jellemző $\sigma_{\beta}(z)$ függvényeket. Ezek az eredmények találhatóak a 3.3.3. táblázatban.

3. A mérésekből az addíciós formula segítségével kiszámoltuk az egyes atomokra vonatkozó hatáskeresztmetszet értékeket (3.3.2. egyenlet). Ezen adatokból pedig kiszámoltuk az adott összegképletű, de általunk nem lemért molekulákra vonatkozó $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ értékeket.

4. A $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ adatokból pedig visszaszámolhatóak az ismeretlen minta esetén mérhető $R(z)$ függvények. Néhány kábítószer, robbanóanyag és fedőanyag esetére kiszámoltuk $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ és $R(z)$ értékeket $z = 2\text{cm}$, 5cm és 8cm mintavastagság esetére. Ez látható a 3.3.4. táblázatban, ahol feltüntettem néhány ún. új pszichoaktív szert is. Megjegyzés: a táblázatban látható felosztás önkényes, hiszen pl. a cukrokat a fedőanyagoknál tüntettem fel, de a kábítószerhez is tartozhatnak [107,108].

A 3.3.5. táblázat $\sim 0,2\text{cm}$, ill. $\sim 5\text{cm}$ és $\sim 8\text{cm}$ rétegvastagságú mintákon elvégzett mérések (és a velük kapcsolatos számítások) összehasonlítását mutatja be. A [66] irodalomban szereplő $\sigma_{\beta}(\text{H})$, $\sigma_{\beta}(\text{C})$, $\sigma_{\beta}(\text{O})$, $\sigma_{\beta}(\text{N})$ értékekkel számított adatok láthatóak a $\sigma_{\beta\text{mol}}(0,2)$ feliratú oszlopban, a [107] irodalomban szereplő adatokkal számított eredmények pedig $\sigma_{\beta\text{mol}}(5)$, ill. $\sigma_{\beta\text{mol}}(8)$ felirattal. A harmadik és az ötödik számoszlop tartalmazza az $\sigma_{\beta\text{mol}}(5)/\sigma_{\beta\text{mol}}(0,2)$, ill. $\sigma_{\beta\text{mol}}(8)/\sigma_{\beta\text{mol}}(0,2)$ hányadosokat, amelyek értéke $\sim 0,6$, ill. $\sim 0,34$ az összes minta esetén. Megjegyzés: kiszámoltam az értékeket a [66] és a [107] irodalomban vizsgált anyagokra egyaránt. Az eredmény azt mutatja, hogy a neutron reflexiós módszer jól alkalmazható kiterjedt közegek analízise esetében is, azaz a valóságot közelítő méretű tiltott anyagok kimutatására. A vastag és vékony mintákra kapott $\sim 0,6$, ill. $\sim 0,34$ arányok jobban értelmezhetőek a vastag mintákban történő neutron abszorpcióval, mint a beeső és reflektált neutronok spektrumának változásával.

A 3.3.6. táblázatban néhány tiltott-, ill. fedőanyagra számítottuk ki a hatáskeresztmetszet- és relatív beütésszám adatokat különböző mintavastagságokra. (Megjegyzés: a táblázat első oszlopaiban az adott anyag mintavastagsága van cm-ben feltüntetve.) Az ehhez szükséges adatokat már korábban feltüntettük a 3.3.8. ábrán, ill. a 3.3.3. táblázatban. A 3.3.9. ábrán ugyanezen anyagok esetén ábrázoltuk az adott vastagságra vonatkozó hatáskeresztmetszet és a virtuális, nullavastagságú mintára vonatkozó hatáskeresztmetszet arányát. Az arányok minden esetben azonosak voltak, kivétel homok esetében.

3.3.5. táblázat: Vékony, ill. vastag mintákra vonatkozó mérések összehasonlítása [66,107]

Reflektor	$\sigma_{\beta\text{mol}}(0,2)$	$\sigma_{\beta\text{mol}}(5)$	A(5/0,2)	$\sigma_{\beta\text{mol}}(8)$	A(8/0,2)
Benzol (C ₆ H ₆)	121,92	73,14	0,6	41,16	0,34
n-Hexán (C ₆ H ₁₄)	259,27	155,38	0,6	87,64	0,34
Toluol (C ₇ H ₈)	159,41	95,61	0,6	53,83	0,34
n-Heptán (C ₇ H ₁₆)	296,76	177,85	0,6	100,31	0,34
Etilbenzol (C ₈ H ₁₀)	196,9	118,08	0,6	66,5	0,34
Xilol (C ₈ H ₁₀)	196,9	118,08	0,6	66,5	0,34
Aceton (C ₃ H ₆ O)	115,06	69,06	0,6	39,02	0,34
Benzil-alkohol (C ₇ H ₈ O)	162	97,26	0,6	54,84	0,34
Anilin (C ₆ H ₇ N)	143,89	85,67	0,6	48,24	0,34
Butil-alkohol (C ₄ H ₁₀ O)	186,89	112,09	0,6	63,31	0,34
Citromsav (C ₆ H ₁₀ O ₆)	206,14	124,16	0,6	70,46	0,34
Dietil-éter (C ₄ H ₁₀ O)	186,89	112,09	0,6	63,31	0,34
Glicerin (C ₃ H ₈ O ₃)	154,58	92,92	0,6	52,66	0,34
Bonamid (C ₈ H ₁₁ ON)	215,15	128,44	0,6	72,49	0,34
Hexametilén-tetramin (C ₆ H ₁₂ N ₄)	240,98	143,82	0,6	81,1	0,34
Kokain (C ₁₇ H ₂₁ NO ₄)	429,27	257,2	0,6	145,17	0,34
Morfin (C ₁₇ H ₁₉ NO ₃)	392,34	234,99	0,6	132,54	0,34
Heroin (C ₂₁ H ₂₃ NO ₅)	478,8	287,05	0,6	162	0,34
LSD (C ₂₀ H ₂₅ N ₃ O)	509,23	303,6	0,6	171,07	0,34
Nikotin (C ₁₀ H ₁₄ N ₂)	281,47	167,52	0,6	94,38	0,34
Koffein (C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂)	221,28	130,38	0,59	73,6	0,33
Mentol (C ₁₀ H ₂₀ O)	377,48	226,35	0,6	127,71	0,34
Ammónium-nitrát (N ₂ H ₄ O ₃)	86,05	50,57	0,59	28,81	0,33
Nitroglicerín (C ₃ H ₅ N ₃ O ₉)	133,01	78,73	0,59	45,1	0,34
PETN (C ₅ H ₈ N ₄ O ₁₂)	203,39	120,59	0,59	68,93	0,34
TNT (C ₇ H ₅ N ₃ O ₆)	137,84	81,42	0,59	46,27	0,34
Tetril (C ₇ H ₅ N ₅ O ₈)	152,62	89,22	0,58	50,83	0,33
Glükóz (C ₆ H ₁₂ O ₆)	240,47	144,72	0,6	82,08	0,34
Szaharóz (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)	444,02	267,23	0,6	151,53	0,34
Metanol (CH ₄ O)	74,42	44,68	0,6	25,3	0,34
Etanol (C ₂ H ₆ O)	108,91	65,35	0,6	36,96	0,34
Polietilén (CH ₂)	37,49	22,47	0,6	12,67	0,34
Hungarocell (C ₈ H ₈)	162,56	97,52	0,6	54,88	0,34
Melamin (C ₃ H ₆ N ₆)	141,27	80,91	0,57	45,63	0,32
Víz (H ₂ O)	36,93	22,21	0,6	12,63	0,34

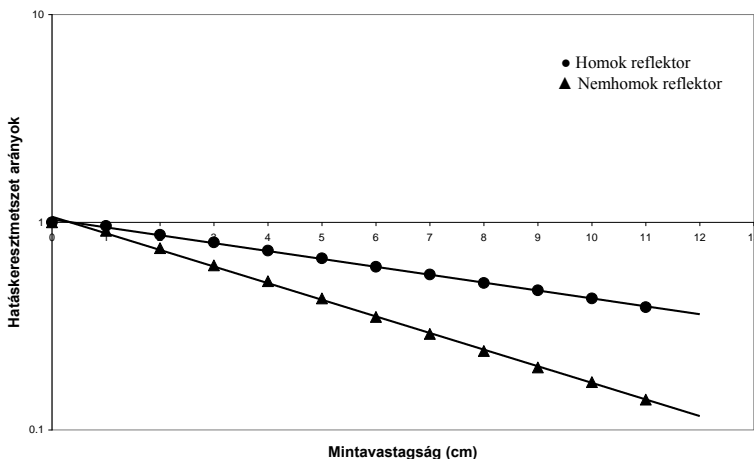
Fontos megjegyezni, hogy a BITATRON elrendezésre Csikai–Buczkó [66] által bevezetett reflexiós hatáskeresztmetszet koncepció hasznosnak bizonyult egyrészt annak kimutatására, hogy ez az elemek esetén szoros korrelációban van a Maxwell-spektrumra átlagolt rugalmas szórás hatáskeresztmetszettel ($\sigma_{\beta} \approx 0,6\sigma_{\text{EL}}$), aminek alapján az ismeretlen σ_{EL} értékeket becsülni lehetett, másrészt lehetővé teszi a $\sigma_{\beta\text{mol}}$ adatok vastagság függésének meghatározását is a 0,2-8cm intervallumban.

3.3.6. táblázat: Számított σ_β és R értékek néhány anyagra

Kokain			TNT			Glükóz		
Z (cm)	σ_β	R	Z (cm)	σ_β	R	Z (cm)	σ_β	R
1	550,76	0,66	1	172,8	0,38	1	308,04	0,8
2	455,12	1,63	2	143,12	0,94	2	254,94	1,99
3	376,31	2,24	3	118,55	1,3	3	211,08	2,75
4	311,11	2,59	4	98,23	1,51	4	174,78	3,19
5	257,2	2,76	5	81,42	1,61	5	144,72	3,4
6	212,48	2,78	6	67,4	1,63	6	119,76	3,43
7	175,69	2,72	7	55,87	1,59	7	99,18	3,36
8	145,17	2,59	8	46,27	1,52	8	82,08	3,21
9	120,12	2,43	9	38,38	1,43	9	68,04	3,02
10	99,44	2,25	10	31,86	1,33	10	56,4	2,79
11	82,15	2,05	11	26,39	1,22	11	4,68	2,56

LSD			Homok			CH ₂		
Z (cm)	σ_β	R	Z (cm)	σ_β	R	Z (cm)	σ_β	R
1	651,46	0,73	1	4,78	0,04	1	48,18	0,97
2	538,05	1,8	2	4,37	0,12	2	39,8	2,4
3	444,67	2,48	3	3,99	0,18	3	32,9	3,3
4	367,42	2,87	4	3,65	0,23	4	27,19	3,82
5	303,6	3,05	5	3,33	0,21	5	22,47	4,06
6	250,68	3,08	6	3,05	0,3	6	18,56	4,1
7	207,16	3,01	7	2,79	0,32	7	15,34	4
8	171,07	2,87	8	2,55	0,34	8	12,67	3,81
9	141,46	2,69	9	2,33	0,35	9	10,48	3,58
10	117,04	2,48	10	2,13	0,36	10	8,67	3,31
11	96,63	2,27	11	1,94	0,36	11	7,16	3,02

AmNitrát			Zeolit			H ₂ O		
Z (cm)	σ_β	R	Z (cm)	σ_β	R	Z (cm)	σ_β	R
1	107	0,7	1	24,77	0,12	1	47,12	0,79
2	88,69	1,73	2	20,69	0,31	2	39,03	1,96
3	73,52	2,39	3	17,28	0,43	3	32,34	2,7
4	60,96	2,78	4	14,43	0,51	4	26,8	3,14
5	50,57	2,96	5	12,06	0,55	5	22,21	3,34
6	41,92	3	6	10,07	0,56	6	18,4	3,38
7	34,77	2,94	7	8,41	0,55	7	15,25	3,31
8	28,81	2,81	8	7,03	0,53	8	12,63	3,17
9	23,92	2,65	9	5,87	0,5	9	10,48	2,98
10	19,85	2,45	10	4,9	0,47	10	8,69	2,76
11	16,46	2,25	11	4,09	0,43	11	7,2	2,53



3.3.9. ábra: Hatáskeresztmetszet arányok

4. Összefoglalás

Az ENSZ Nemzetközi Atomenergia Ügynöksége (NAÜ) által kezdeményezett és támogatott nemzetközi kutatási programban a kiterjedt közegek hidrogéntartalmának meghatározására (1997) és a lakosság elleni taposóaknak kimutatására (1999) javasolt, neutronokra alapozott módszerek kidolgozásába a DE Kísérleti Fizikai Tanszék és az MTA ATOMKI kutatói is bekapcsolódtak. Én 2010-ben, mint PhD hallgató csatlakoztam a témához, Csikai professzor vezetésével. Feladatomból volt a BITATRON és az ETNA módszerek lehetőségeinek vizsgálata és továbbfejlesztése, vagyis a neutronreflexiós módszer kiegészítése az aktivációval. A neutronok alkalmazását a fémdetektorokkal szemben az indokolta, hogy a szerves robbanóanyagok kimutatása a magas hidrogéntartalmuk alapján igen kedvező. Az aktivációs módszer lehetővé tette a termikus és az epitermikus neutronok fluxuseloszlásának helyszerinti pontos meghatározását. Vizsgálataim során a reflektált neutronokat BF₃ detektorral mértem és a relatív $R=(I-I_0)/I_0$ értékeket határoztam meg, ahol I₀ a reflektor nélkül mért, az I pedig a reflektor használatával mért beütésszámokat jelöli.

1. Mérések az ETNA mérési összeállítással: Az ETNA elrendezés egy 18,5GBq aktivitású Pu-Be forráson és két nagyméretű, henger alakú BF₃ számlálón alapul.

1.1. Az első kísérletsorozatban a neutronok fluxusának eloszlását vizsgáltuk, reflektorként Al mintatartókba helyezett homokmintákat használva, amelyek közül az egyiket polietilénnel teli doboz helyettesítette, amelynek változtattuk a helyzetét. Az eloszlást vizsgáltuk úgy is, hogy a számlálókat az üres moderátor felszínen mozgattuk egy egyenes mentén. A fluxuseloszlást többféleképpen vizsgáltuk: a számlálók hossz tengelye mentén, arra merőlegesen és átlós irányban mozgatva a PE-nel teli mintatartót és megvizsgáltuk a Cd borítású és üres felszín esetén. Megállapítottuk, hogy az R értékére, a PE-nel telt mintatartó és a rendszer szimmetriatengelye közötti távolság függvényeként, 0,46, ill. 0,13 maximális adatok nyerhetők a Cd lemez használatával, ill. nélküle. Megfigyeltük azt is, hogy üres moderátorfelszínen történt fluxuseloszlás-méréseknél az eloszláshoz tartozó FWHM értékét nem befolyásolta a Cd lemez jelenléte, reflektor használatával azonban igen.

1.2. A második kísérletsorozatban megmértük újra az üres moderátorfelszínen a fluxuseloszlást, de a számlálókat beborítottuk Cd lemezzel, hogy kivédhessük a környezet hatására szóródott neutronok

okozta háttérét. Megvizsgáltuk homok, ill. PE töltésű mintatartók, mint reflektorok hatását. A DLM2 mintát papír, ill. ruhaanyag közé rejtettük el különböző mélységben. A DLM2 mintához hasonló mennyiségű hidrogént tartalmazó mintákat is vizsgáltunk: PE, ammónium-nitrát és melamin alkalmazásával. Vizsgálódtunk úgy is, hogy az Al dobozt adott magasságig megtöltve homokkal, a DLM2 mintát különböző mélységben rejtettük el benne. Így változott a DLM2 és a detektorok közötti függőleges irányú távolság.

Azt tapasztaltuk, hogy a neutronok fluxuseloszlása függ a minta és a detektorok egymáshoz viszonyított távolságától és változik attól függően is, hogy a moderátoron van-e Cd borítás. Az R maximumát a rendszer geometriai középpontjában éri el 0,64, ill. 0,17 értékekkel Cd borítás, ill. annak hiánya esetén. Megjegyzés: A moderátorfelszínen végzett fluxuseloszlás-mérés során kapott FWHM értéke ~12cm volt Cd lap nélkül és használatával is. Ellenben reflektort is alkalmazva ~12cm, ill. ~16cm értéket kaptunk. DLM2 és PE reflektorokat használva a fluxuseloszlásokhoz tartozó FWHM értékekre ~8 cm adódott, amely jóval alacsonyabb, mint a szabad felszínhez tartozó hasonló adat.

Az R, mint a homokreflektor szimmetriatengelyében elhelyezkedő DLM2 és a detektor távolságának függvénye, azt mutatja, hogy a DLM2 kimutathatósági távolságának a maximuma ~8cm. Méréseket végeztünk DLM2 nélküli homokreflektorral is, annak megállapítására, hogy különböző vastagságú közeghez mekkora relatív beütésszámok tartoznak. Megállapítottuk, ha a detektor és a minta közötti homokréteg vastagsága több, mint 8-10cm, akkor a DLM2 hatását már nem tudjuk elkülöníteni a háttértől. Az összehasonlíthatóság érdekében más anyagokat is használtunk reflektorként és azt az eredményt kaptuk, hogy ~8cm-es vastagságnál minden esetben elértük a telítési értéket.

Az ETNA és a BITATRON mérőrendszerekkel kapott, 8cm-es mintavastagságra vonatkozó R értékek összehasonlítása szerint az ETNA módszerrel, Cd lap használata mellett, hidrogén tartalmú minták esetén, a relatív beütésszámok telítési értékei egy kettes faktorról nagyobbak lesznek, mint BITATRON alkalmazásával. Az R értékeire 1,2, 0,8, ill. 0,7 értéket kaptunk az ETNA-val való kísérlet során, amikor PE-t, melamint, ill. ammónium-nitrátot rejtő, 1,2kg tömegű papírreflektort vizsgáltunk. A papír helyett 0,55kg textilanyagot használva pedig ugyanezen adatokra 1, 0,4, ill. 0,5 értékeket nyertünk. Ebből látható, hogy hidrogéntartalmú plasztik robbanószerkezet kimutatása ilyen körülmények között nehéz, amit az a tény is bonyolultabbá tesz, hogy a különféle papírok és ruhaanyagok kémiai összetétele nem azonos.

2. Összehasonlító mérések az ETNA és a BITATRON mérési összeállításokkal: A BITATRON elrendezés egy 18,5GBq aktivitású Pu-Be forráson és egy kisméretű, henger alakú BF₃ számlálón alapul, amelynek érzékeny hossza a minta átmérőjével egyezik meg. Az aktivációs fóliákkal elvégzett mérések során pedig egy 185GBq aktivitású Pu-Be forrást, egy végablakos GM számlálót és 19mm átmérőjű In, ill. Au fóliákat alkalmaztunk.

2.1. Az első mérési sorozatban célunk az volt, hogy a tiltott anyagok vizsgálatához szükséges alapvető reflektoranyagokat megvizsgáljuk reflexiós és aktivációs módszerrel, ill. hogy megállapítsuk a relatív beütésszám és a hatáskeresztmetszet mintavastagságtól (z) való függését. A kétféle mérési módszernél a kapott R értékek jelentősen eltértek egymástól. A keresett $R(z)$ függvények alakját az exponenciális eloszlás eloszlás-függvényével írhattuk le. (Vagyis az $R(z) = R_0[1 - \exp(-\Sigma_\beta z)]$ alakban.) Azt is tapasztaltuk, hogy a kapott eredmények nem egzaktak, értékük függ a reflektorok kémiai összetételétől és a mérési geometriától.

2.2. A második kísérletsorozatban a mérési körülményeken és geometrián nem változtattunk, de kiszélesítettük a megvizsgált minták körét. Célunk volt, hogy az $R(z)$ függvényeket meghatározzuk és a mérési eredményekből visszszámoljuk a mintákra vonatkozó σ_β mikroszkopikus hatáskeresztmetszeteket. Meghatároztuk a C, O, H és N atomokra vonatkozó σ_β értékeket, majd az addíciós formula segítségével a molekulákra vonatkoztatott $\sigma_{\beta\text{mol}}$ hatáskeresztmetszet adatokat. Megmértük a bonamid moderátor szabad felszínén Dy és In aktivációs fóliákkal a síkbeli fluxus-eloszlást is. Azt tapasztaltuk, hogy az eloszlásfüggvénnyel jól közelíthetők a BITATRON és az aktivációs módszer esetén is a kísérleti adatok. Az R_0 értékek összehasonlítása azt mutatja, hogy a termikus, ill. rezonancia neutronok esetén az eredmények még ugyanazon reflektor esetén is eltérnek. Megállapítottuk, hogy a molekulákra vonatkozó $\sigma_{\beta\text{mol}}$ értékek eltérőek, ha a drogokat összehasonlítjuk a robbanó-, ill. fedőanyagokkal. Megjegyzés: ez azt jelenti, hogy a kábítószereket könnyebben el tudjuk különíteni a rejtő anyagoktól ezzel a módszerrel, de robbanószer kimutatásához a nitrogénre vonatkozó hatáskeresztmetszet pontos meghatározása szükséges.

3. A BITATRON mérési összeállítással végzett további vizsgálatok: A BITATRON mérési geometriával végeztünk újabb méréseket, azon célból, hogy a $\sigma_\beta(\text{H})$, $\sigma_\beta(\text{C})$, $\sigma_\beta(\text{O})$, $\sigma_\beta(\text{N})$ értékek vastagság (z) függését meghatározzuk és megadjuk ezen függvények kapcsolatát a mért $R(z)$ függvényekkel. A σ_β adatok ismeretében kiszámoltuk a $\sigma_{\beta\text{mol}}$ értékeket is.

3.1. Az első mérési sorozatban NH_4NO_3 tartalmú műtrágyát vizsgáltunk, a nitrogénre vonatkozó adatok miatt. Mértünk DLM2 mintával is és megvizsgáltuk, hogy különböző fedőanyagok (SiO_2 , CH_2 , zeolit) hogyan változtatják meg a kimutathatóságát. Az R , ill. σ_β értékeket lemértük, ill. kiszámoltuk különböző reflektoranyagokra, amelyek nagysága megegyezett a DLM2, ill. a tárolóedény méretével. Kimértük fedőanyagok, ill. NH_4NO_3 esetén az $R(z)$ és a $\sigma_\beta(z)$ függvényeket. Az eredményeket az R , σ_β és Σ_β értékek segítségével jellemeztük, az utóbbi két adat a kiterjedt minta egészére átlagolt értékek, amelyek kiszámításánál figyelembe vettük a reflektorban lévő molekulák vagy atomok számát.

A kapott adatok vizsgálatával a következő megállapításokat tettük: A makroszkopikus (Σ_β) és mikroszkopikus (σ_β) hatáskeresztmetszeteknek a legnagyobb értékét a magányos DLM2 esetén mértük. A reflektált neutronok hozamában csökkenést tapasztaltunk a fedőanyagok hatására. Ennek oka az, hogy a bejövő és a reflektált neutronok száma is csökken a vizsgált anyag neutronabszorpciója miatt. A homokban elkevert NH_4NO_3 esetén a hidrogén tartalmú anyag tömegének növekedésével csak adott koncentrációig nő a beütésszám, majd telítésbe megy. A szeparált helyzetű SiO_2 és NH_4NO_3 esetén a σ_β értékek csökkennek a mintavastagság növekedésével. Megállapítható, hogy az ammónium-nitrát hatóanyag koncentrációját növelve (összekevert SiO_2 és NH_4NO_3 esetén) a σ_β is nő, így a robbanóanyag kimutatásának valószínűsége növekszik. Ha a robbanóanyagot $\sim 8\text{cm}$ -nél vastagabb rétegű talajba vagy hidrogén tartalmú anyagba rejtik el, akkor már a róla érkező jeleket nem lehet elkülöníteni a környezet hatásától, mint háttértől (a beütésszámok telítésbe mennek). Vagyis ennél mélyebbre elásott taposóaknát nem tudunk kimutatni ezzel a módszerrel. Az eredmények azt mutatják, hogy a robbanóanyagok kimutatásához együtt ajánlott használni a neutronreflexión alapuló- és a hagyományos fémdetektorokat. Így egy adott terület szkennelésénél az aknák fém alkotórészeit és hidrogén tartalmú összetevőit is észlelni lehet.

3.2. A második kísérletsorozatban azt vizsgáltuk meg, hogy az $R(z)$ függvények segítségével hogyan lehet meghatározni a $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ és a $\Sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ hatáskeresztmetszetek mintavastagságtól való függését különböző minták esetén. Ezekből az adatokból megadtuk a $\sigma_\beta(z)$ függvényeket az általunk vizsgált szerves anyagokat alkotó C, H, O, N elemekre, amely értékekből már kiszámolható bonyolultabb molekulák esetén is a hatáskeresztmetszet.

Azt az eredményt kaptuk, hogy $\sigma_\beta(z)$ exponenciálisan csökken a z növelésével, a $\sigma_\beta(z) = \sigma_\beta(0)\exp(-kz)$ formula szerint. Ezzel az

összefüggéssel számoltuk ki a referenciaként használt $\sigma_{\beta}(\text{H})$, $\sigma_{\beta}(\text{C})$, $\sigma_{\beta}(\text{O})$, $\sigma_{\beta}(\text{N})$ értékeket és ezekből az adatokból az ismeretlen anyagokra vonatkozó $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ és $R(z)$ függvényeket. A molekulákra vonatkozó értékeket egy egyszerű addíciós képlettel számoltuk ki: $\sigma_{\beta\text{mol}}(z) = \sum_i n_i \sigma_{\beta i}(z) = R / \text{CN}_{\text{mol}} z$. A mért és a számított $R(z)$ függvények alapján azt kaptuk, hogy 0-10cm mintavastagság esetén a mért és a számított hozamok 10%-os hibahatáron belül megegyeznek egymással. Fontos megjegyezni azonban, hogy a tiltott anyagok kimutatását befolyásolja az ezeket körülvevő fedőanyagok minősége és mennyisége is. Ezért hasznos kiegészíteni a reflexiós módszert a spektrumra vonatkozó „unfolding” eljárással. A módszer érzékenysége növelhető, abban az esetben is, ha a BITATRON és az ETNA mérési elrendezéseket kombináljuk.

Tehát mérési módszerünk a következő volt: Az első lépésben nagy tisztaságú anyagokra lemértük az $R(z)$ függvényeket. Ezután más vegyületekre is meghatároztuk ezeket és az eredményekből kiszámoltuk az anyagokra jellemző $\sigma_{\beta}(z)$ függvényeket. A mérésekből az addíciós formula segítségével kiszámoltuk az egyes atomokra vonatkozó hatáskeresztmetszet értékeket. Ezen adatokból pedig meghatározhatók voltak az adott összegképletű, de általunk nem lemérhető molekulákra vonatkozó $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ értékek is. Ez utóbbiakból pedig visszaszámolhatók az ismeretlen minta esetén várható $R(z)$ függvények, pl. az új pszichoaktív szerek esetében is.

Mindezekből látható, hogy az ilyen típusú vizsgálatokra a jövőben is szükség lesz.

5. Summary

The International Atomic Energy Agency has coordinated and supported the international research programs to determine the hydrogen content of bulk samples (from 1997) and to detect the anti-personnel landmines (from 1999). The co-workers of the Institute of Experimental Physics of University of Debrecen and Institute of Nuclear Research of Hungarian Academy of Sciences joined the project by the development of the required methods based on neutrons. In 2010, I myself (as PhD student) joined the topic under the leadership of Prof. Csikai as my supervisor. My task was to study and develop of the BITATRON and ETNA methods, namely to improve the neutron reflection technique and to complete it by the neutron activation process. The advantage of the neutron methods contrary to application of metal detectors was the detection of the organic explosives on the base of their high hydrogen contents. The activation method allowed of the determination of the flux distributions for thermal, epithermal and resonance neutrons. In my experiments the reflected neutrons were detected by BF_3 counters of different dimensions. The relative excess counts produced by the thermal neutrons were determined via the $R=(I-I_0)/I_0$ values, where I_0 and I were the number of counts without and with reflector, respectively.

1. Measurement with ETNA arrangement: The ETNA equipment is based on a Pu-Be source of 18.5GBq activity and two cylindrical BF_3 counters of $\sim 80\text{cm}^3$ sensitive volumes.

1.1. In the first series of experiments the neutron flux distributions for sand reflectors placed in cylindrical shaped Al sample holders (beer-boxes) were investigated. One of the boxes filled with a polyethylene (PE) granulate was placed in different positions among the others. The PE sample was moved along, perpendicular and diagonal directions to the longitudinal axis of the counters using with and without Cd covered moderator surface. It was found that the maximum values of R (as a function of the distance between the polyethylene sample and symmetry axis of the system) were found to be 0.46 and 0.13 with or without Cd cover, respectively. In addition, it was observed that the FWHM value was not influenced by the Cd cover without reflector but in its present a definite change was observed.

1.2. In the second series of experiments we measured the flux distributions on the free moderator surface covering the counters with a Cd layer to eliminate the environmental scattered neutrons. We used the following reflectors: Al sample holders filled with sand or PE samples;

DLM2 sample placed into paper and clothes environments; PE, ammonium-nitrate and melamine samples containing the similar amount of hydrogen as present in the DLM2. In these experiments the DLM2 was placed inside the bulk sand reflector in various depths so the vertical distance between the DLM2 and the detectors could be changed.

In these measurements we could determine the dependence of the flux distribution of neutrons on the distance between the sample and the detectors. The results were influenced by the Cd plate if it placed on the moderator surface. The maximal values of R were 0.64 and 0.17 with and without Cd plate, respectively. These data were obtained in the geometrical center of the system, i.e. a factor of ~4 could be achieved in the value of R by using a Cd layer. Note: The FWHM value of the flux distribution was ~12cm with and without Cd plate on the moderator surface without reflector materials. However using reflector these data were ~12cm and ~16cm with and without Cd plate, respectively. In the case of DLM2 or PE reflectors the FWHM value was ~8 cm only (see Figures: 3.1.3; 3.1.4. and 3.1.5.).

The values of R were determined as a function of the distance between the DLM2 and the detectors. (Note: DLM2 was placed in the symmetrical axis of the sand reflector.) The R values indicated that DLM2 could be detected only up to depth of ~8cm in dry sand. We studied the effect of sand reflector of different thicknesses on the value of R without using the DLM2. It was found if the thickness of the sand layer present between the detector and sample was higher than 8-10cm then we could not separate the effect of DLM2 from the background. For some other reflector materials the saturation thickness was found at ~8cm.

A comparison of the R values obtained by ETNA and BITATRON measuring geometries for 8cm sample thicknesses has shown the advantage of the ETNA method in the case of hydrogenous materials with Cd covered moderator. The R values were 1.2, 0.8 and 0.7 when we hid PE, melamine and ammonium-nitrate samples in 1.2kg paper reflector. However, if we changed the paper to 0.55kg textile the R values were 1, 0.4 and 0.5, respectively. So the detection of the plastic explosives containing high amount of hydrogen is difficult, in addition to the fact that the various paper- and clothes chemically are not identical.

2. Comparative measurement with ETNA and BITATRON arrangements: The BITATRON equipment is based on a Pu-Be source of 18.5GBq activity and a single cylindrical BF₃ counter of 15cm³ sensitive volume. However we used a Pu-Be source of 185GBq activity, as well as a GM counter in order to measure the activity of the In, Dy and Au foils.

2.1. In the first series of experiments we have investigated some important reflector materials using both the reflection and activation methods to study the $R(z)$ and $\sigma_{\beta}(z)$ functions, where z denotes the thickness of the reflector. The values of R were significantly different obtained by the activation and reflection methods. The structure of the $R(z)$ functions was characterized in a similar manner like to the structure of the distribution function of the exponential distribution. (Namely using the $R(z)=R_0[1-\exp(-\Sigma_{\beta}z)]$ expression.) It was observed that the results were not exact because the $R(z)$ values depended on the elemental composition of the reflector materials and the measuring geometry.

2.2. In the second series of experiments we have used the same experimental circumstances for different sample materials. Our aim was to determine the $R(z)$ functions and deduce the microscopic cross sections (σ_{β}) for the reflector materials. We obtained the σ_{β} data for C, O, H, N and calculated the $\sigma_{\beta\text{mol}}$ values for the molecules by the additional formula. The lateral flux distributions have been measured with Dy and In activation foils on the empty surface of the bonamide moderator have also been investigated. It was obtained that the distribution function could approximate well the experimental data obtained both with the BITATRON and the activation methods. The results based on R_0 data might be different for the same reflector in the case of thermal and resonance neutrons. We obtained the $\sigma_{\beta\text{mol}}$ values were different for some groups of samples like drugs, explosives and hiding materials. Note: Because the explosives contain nitrogen; we do need to determine the cross section of this atom with high precision.

3. Further measurements with BITATRON arrangement: The BITATRON equipment was used for further investigations to determine the $\sigma_{\beta}(z)$ functions in the case of H, C, O, N which rendered to obtain the relation between $\sigma_{\beta}(z)$ and $R(z)$ functions possible. In the knowledge of σ_{β} data the $\sigma_{\beta\text{mol}}$ values were calculated, too.

3.1. In the first series of experiments we have measured the σ_{β} data for fertilizer containing NH_4NO_3 to deduce the cross section for N. The R value was measured with DLM2 sample and searched how the experiment could be affected by some hiding materials (SiO_2 , CH_2 and zeolite). The R and σ_{β} values were measured and calculated for DLM2 as well as for some other container sized reflector materials or rather for hiding materials and ammonium-nitrate. These results rendered to deduce the R , σ_{β} and Σ_{β} values possible. The σ_{β} and Σ_{β} data were average values over bulk samples and we took notice of the number of the molecules or atoms for their determination.

We obtained the following results: The macroscopic (Σ_β) and microscopic (σ_β) cross sections had the highest value in the case of lonely DLM2 sample. The yield of the reflected neutrons was decreased in the presence of hiding materials. The reason of this effect can be explained by the absorption of the incoming and reflected neutrons in the samples to be investigated. In the case of mixed sand and NH_4NO_3 the excess counts achieved saturation with increasing the mass of the hydrogenous material. In this arrangement of the separated sand and ammonium-nitrate the σ_β values decreased with increasing the thickness of the reflector material. However, if the concentration of NH_4NO_3 was increased (in the case of mixed samples) then the σ_β value became higher and the probability of the detection and identification of the explosives would be increased. If the blasting agent was hidden deeper than $\sim 10\text{cm}$ in soil or hydrogenous materials then we could not separate the signals of explosive from the environmental ones (because the excess counts reached the saturation value). Namely this method is not able to detect the landmines if they were placed deeper than $\sim 10\text{ cm}$ in any kind of environmental materials. Our results indicate that we need to use the neutron- and metal detectors simultaneously for the detection of explosives via their metal- and hydrogenous components.

3.2. In the second series of experiments it was studied the possible analytical expressions for $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ and $\Sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ as a function of reflector thickness deduced from the measured $R(z)$ relations. The $\sigma_\beta(z)$ functions for the C, H, O, N elements were determined and these data could be used to calculate the cross sections for the molecules.

The results show that $\sigma_\beta(z)$ decrease exponentially with increasing z (namely with the $\sigma_\beta(z)=\sigma_\beta(0)\exp(-kz)$ formula can be used). So we could calculate the σ_β data for the reference elements (C, H, O, N) and through them to determine the $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ and $R(z)$ functions for unknown materials. The data were calculated for molecules with the simple addition formula: $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)=\sum_i n_i \sigma_{\beta i}(z)=R/CN_{\text{mol}}z$. Data obtained by this procedure is based on measured and calculated $R(z)$ functions. In this case the measured and calculated yields were the same within 10% error limit for the region of 0-10cm sample thicknesses. Note: The detection of illicit materials was influenced by the quality and quantity of the surrounding hiding materials. So the sensitivity of the reflection method may increase by using the “unfolding” method for the analysis of the spectra of backscattered neutrons. In addition the BITATRON and ETNA methods are recommended to use simultaneously.

Thus our measuring method was: In the first step we studied the $R(z)$ functions for high quality materials. Later we determined these functions

for another compounds and calculated the $\sigma_{\beta}(z)$ functions. From these results we deduced the cross section data for C, H, O, N atoms by the addition formula. So we could determine the $\sigma_{\beta\text{mol}}(z)$ data for compounds what we did not measure but their atomic formulas were well known. These results rendered possible to calculate the $R(z)$ functions for unknown samples, for example in the case of designer drugs.

These investigations are strongly recommended in the future.

6. Irodalomjegyzék

- [1] J. Csikai: Neutrons as everyday tools. Second International Symposium on Radiation Education Symposium, Debrecen, Hungary, 21-24 August, 2002.
- [2] E. Amaldi, E. Fermi: On the absorption and the diffusion of slow neutrons. *Physical Review* 50 (1936) 899-928.
- [3] en.wikipedia.org/wiki/Mexican_drug_war
- [4] J. Csikai, I. ElAgib, Cs.M. Buczkó: Studies on the neutron reflection, scattering and transmission methods used for bulk hydrogen analysis. *Bulk Hydrogen Analysis using Neutrons*, 93.-105. oldal, IAEA/PS/RCM98-2, IAEA HQ, Vienna, 17-20 November 1998.
- [5] A remotely controlled multi-sensor platform for humanitarian demining. Report of the Advisory Group Meeting held 3-7 April 2000 at the IAEA Headquarters, Vienna, Austria, IAEA/PS/AG-1093.
- [6] Bernhard Bröcker: SH atlasz (Atomfizika). Springer Hungarica Kiadó, Budapest, 1995.
- [7] Fényes Tibor (szerk.): *Atommagfizika*. Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 2005.
- [8] Kiss Dezső és Quittner Pál (szerk.): *Neutronfizika*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971.
- [9] Csikai Gyula (Szalay Sándor előadásai alapján): *Radioaktivitás*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1970.
- [10] Csikai Gyula: *A gyors neutron-adatok és a fúziós reaktorok*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1987.
- [11] Victoria McLane, Charles L. Dunford, Philip F. Rose: *Neutron Cross Sections*. Academic Press Inc., San Diego, USA, 1988.
- [12] *Neutron Cross-Sections*, 1973, BNL-325, 3rd Ed., 1.
- [13] Bornemissza Györgyné (összeállításában): *Neutron indukált reakciók jellemző adatainak táblázatos összeállítása. Melléklet az ATOMKI Közlemények IV. kötetének 3.-4. számához*. ATOMKI, Debrecen, 1962.
- [14] I. Angeli, J. Csikai, P. Nagy: *Semiclassical Description of Fast-Neutron Cross Sections*. *Nuclear Science and Engineering* 55 (1974) 418-426.
- [15] I. Angeli, J. Csikai, J.L. Nagy, T. Scharbert, T. Sztaricskai, D. Novák: *Search for trends in total neutron cross sections*. *Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae* 30/2 (1971) 115-123.

-
- [16] I. Angeli, M. Csatlós: Fine structure in the mass number dependence of RMS charge radii. *Nuclear Physics A*, 288 (1977) 480-492.
- [17] Julius Csikai: Handbook of fast neutron generators, Volume I-II. CRC Press Inc., USA, 1987.
- [18] J. Byrne: Neutrons, nuclei and matter. IOP Publishing Ltd., 1994.
- [19] Gecső Ervin, Maróthy László, Marx György, Sükösd Csaba, Tóth Eszter: Nukleáris ismeretek. Országos Oktatástechnikai Központ, 1989.
- [20] Dag Brune, Bengt Forkman, Bertil Persson: Nuclear analytical chemistry. Chartwell-Bratt Ltd., 1984.
- [21] K.H. Beckurts, K. Wirtz: Neutron physics. Springer-Verlag, 1964.
- [22] Szabó Elek, Simonits András: Aktivációs analízis. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [23] Suresh Garg, Feroz Ahmed, L.S. Kothari: Physics of nuclear reactors. Tata Mcgraw-Hill Publishing Company Limited, India, 1986.
- [24] Glenn F. Knoll: Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons Inc., USA, 1978.
- [25] Simonyi Károly (szerk.): A reaktorfizika és a reaktortechnika alapjai. Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1956.
- [26] Csikainé Buczkó Margit: Radioaktivitás és atommagfizika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.
- [27] Sam S. Nargolwalla, Edwin P. Przybylowicz: Activation analysis with neutron generators. John Wiley & Sons Inc., USA, 1973.
- [28] Koltay Ede: Neutronforrás abszolút intenzitásának mérése. *Magyar Fizikai Folyóirat* 9/2 (1961) 89-106.
- [29] Oláh László: Szcintillátor alapú neutronspektrométer és alkalmazásai (PhD értekezés). Debreceni Egyetem, Természettudományi Kar, Debrecen, 2000.
- [30] S. Sudár: A solution for the neutron spectrum unfolding problem without using input spectrum. International Nuclear Data Committee, January 1989, INDC(HUN)-026/L.
- [31] J. Csikai, I. ElAgib: Bulk media assay using backscattered Pu-Be neutrons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 432 (1999) 410-414.
- [32] M. Yousif Ali, A.M. El-Megrab, S.A. Jonah, Daw May Su, M. Váradi, J. Csikai: Investigations of neutron fields used in elemental analysis of bulk samples. *Nuclear Geophysics* 9/3 (1995) 203-217.
- [33] IAEA/PS/RCM 97-1: Bulk Hydrogen Analysis using Neutrons. Final Report of the First Research Co-ordination Meeting of the

-
- above Co-ordinated Research Programme, IAEA HQ, Vienna, 15-18 July, 1997.
- [34] J. Csikai, E. Hussein, U. Rosengard: Application of nuclear techniques to anti-personnel landmine identification (foreword). *Applied Radiation and Isotopes* 61/1 (2004) 1.
- [35] Dr. Csikai Gyula, Dr. Fenyvesi András: Neutronfizikai kutatások Debrecenben. *Nukleon V. évfolyam* (2012) 118.
- [36] Csikai Gyula: A neutronfizika másodvirágása. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 369-371.
- [37] M. Buczkó, Z. Dezső, J. Csikai: Determination of the bitumen content in asphalt concrete using a neutron reflection method. *Journal of Radioanalytical Chemistry* 25 (1975) 179-183.
- [38] Cs.M. Buczkó, A. Borbély: A simple method for the determination of the average neutron flux for absorbing samples. *Journal of Radioanalytical Chemistry* 42 (1978) 393-398.
- [39] J. Csikai, B. Király, T. Sanami, T. Michikawa: Studies on thermal neutron perturbation factor needed for bulk sample activation analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 488 (2002) 634-641.
- [40] B. Király, T. Sanami, R. Dóczi, J. Csikai: Detection of explosives and illicit drugs using neutrons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 213 (2004) 452-456.
- [41] B. Király, T. Sanami, J. Csikai: Advantages and limitations of thermal and epithermal neutron activation analysis of bulk samples. *Applied Radiation and Isotopes* 58 (2003) 691-695.
- [42] B. Király, J. Csikai: Investigations on thermal neutron reflection by activation method. *Applied Radiation and Isotopes* 52 (2000) 93-96.
- [43] A. Papp, J. Csikai: Detection and identification of explosives and illicit drugs using neutron based techniques. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 288 (2011) 363-371.
- [44] J. Csikai, R. Dóczi: Neutron gas physics research at the institute of experimental physics, Debrecen University. *Acta Physica Debrecina* 41 (2007) 49-50.
- [45] R. Dóczi, J. Csikai: An improved method for bulk hydrogen analysis using epithermal neutrons. *Applied Radiation and Isotopes* 66 (2008) 1870-1872.
- [46] J. Csikai, R. Dóczi: A comparison of the neutron thermalization and reflection methods used for bulk hydrogen analysis. *Applied Radiation and Isotopes* 65 (2007) 764-768.

-
- [47] J. Csikai, R. Dóczy: Optimization of source-sample-detector geometries for bulk hydrogen analysis using epithermal neutrons. *Applied Radiation and Isotopes* 67 (2009) 70-72.
- [48] R. Dóczy, M.A. Ali, M. Fayez-Hassan, J. Csikai: Determination of hydrogen content in bulk samples using the neutron activation method. *Applied Radiation and Isotopes* 63 (2005) 137-140.
- [49] R. Dóczy, J. Csikai, T. Sanami, M. Fayez-Hassan: Bulk hydrogen analysis using epithermal neutrons. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 266/1 (2005) 11-17.
- [50] D.D. Sood, U. Rosengard, A. Trkov: Development of nuclear technique for the detection of landmines. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VIII*, 21-25 April 2003, Orlando, Florida, USA.
- [51] F.D. Brooks, M. Drog, A. Buffler, M.S. Allie: Detection of anti-personnel landmines by neutron scattering and attenuation. *Applied Radiation and Isotopes* 61 (2004) 27-34.
- [52] J. Csikai, R. Dóczy, B. Király: Investigations on landmine detection by neutron-based techniques. *Applied Radiation and Isotopes* 61 (2004) 11-20.
- [53] P.C. Womble, J. Csikai, P.A. Dokhale, J. Paschal, G. Vourvopoulos: Neutron-based portable drug probe. *Fourth Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications, IRRMA '99*, 3-7. October, 1999.
- [54] Kenneth M. Purcell, Julius Csikai, P. Dokhale, László Oláh, George Vourvopoulos: Principles of a Neutron-based portable drug probe. *ONDCP Int. Tech. Symposium*, Washington D. C., 1999.
- [55] P.A. Dokhale, J. Csikai, L. Oláh: Investigations on neutron induced prompt gamma analysis of bulk samples. *Applied Radiation and Isotopes* 54 (2001) 967-971.
- [56] J. Csikai: Neutron-based techniques for the detection of concealed objects. *Acta Physica et Chimica Debrecina* 37 (2004) 7-31.
- [57] F.D. Brooks, A. Buffler, M.S. Allie: Detection of anti-personnel landmines using neutrons and gamma-rays. *Radiation Physics and Chemistry* 71 (2004) 749-757.
- [58] Esam M.A. Hussein, Marc Desrosiers, Edward J. Waller: On the use of radiation scattering for the detection of landmines. *Radiation Physics and Chemistry* 73 (2005) 7-19.
- [59] G. Viesti, M. Lunardon, G. Nebbia, M. Barbui, M. Cinausero, G. D'Erasmus, M. Palomba, A. Pantaleo, J. Obhodaš, V. Valković: The detection of landmines by neutron backscattering: Exploring the

-
- limits of the technique. *Applied Radiation and Isotopes* 64 (2006) 706-716.
- [60] J. Csikai, B. Király, R. Dóczi: Application of neutrons to plastic landmines detection. Second RCM on Application of Nuclear Techniques to Anti-personnel Landmines Identification, Saint Petersburg, Russian Federation, 11-14 September 2001, IAEA/PS/RC-799-2.
- [61] B. Király, L. Oláh, J. Csikai: Neutron-based techniques for detection of explosives and drugs. *Radiation Physics and Chemistry* 61 (2001) 781-784.
- [62] I. ElAgib, J. Csikai, J. Jordanova, L. Oláh: Leakage neutron spectra from spherical samples with a Pu-Be source. *Applied Radiation and Isotopes* 51 (1999) 329-333.
- [63] J. Jordanova, L. Oláh, A. Fenyvesi, A.M. El-Megrab, I. ElAgib, Darsono, U. Klein, J. Csikai: Validation of neutron data libraries by comparison of measured and calculated neutron leakage spectra. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 421 (1999) 522-530.
- [64] I. ElAgib, J. Csikai: Validation of neutron data libraries by backscattered spectra of Pu-Be neutrons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 435 (1999) 456-461.
- [65] Esam M.A. Hussein: Multi-indicator Radiation Identifier for Landmines. *Proceedings SPIE* 4742, *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VII*, 502-508 (2002).
- [66] J. Csikai, Cs.M. Buczkó: The concept of the reflection cross section of thermal neutrons. *Applied Radiation and Isotopes* 50 (1999) 487-490.
- [67] D.K. Mohapatra, C.P. Reddy: Use of neutron reflection method to assay nuclear materials in solutions. *Applied Radiation and Isotopes* 55 (2001) 693-696.
- [68] Brian Sowerby, James Tickner: Scanner for the Detection of Contraband in Air Cargo Containers. 'The Physicist', Australian Institute of Physics, 42 (2005) 10-16.
- [69] J. Rynes, J. Bendahan, T. Gozani, R. Loveman, J. Stevenson, C. Bell: Gamma-ray and neutron radiography as part of a pulsed fast neutron analysis inspection system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 422 (1999) 895-899.
- [70] S.M. Al-Jobori, S. Szegedi, Cs.M. Buczkó: Determination of hydrogen content in crude oil by the neutron reflection method. *Radiochemical Radioanalytical Letters* 33/3 (1978) 133-138.

-
- [71] S.A. Jonah, A.M. El-Megrab, M. Váradi, J. Csikai: An improved neutron reflection setup for the determination of H and (O+C)/H in oil samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 218/2 (1997) 193-195.
- [72] Cs.M. Buczkó, L. Vas: Effect of climate on chemical composition of fossil bones. *Nature* 269 (1977) 792-793.
- [73] S. Szegedi, D.S. Mosbah, M. Váradi, I. Szalóki: Protein determination in soya bean by fast neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters* 127/2 (1988) 121-132.
- [74] S. Szegedi, M. Váradi, Z.T. Bódy, L. Vas: Examination of zeolites by neutron reflection method. *Acta Physica Hungarica* 69/3-4 (1991) 357-363.
- [75] George Vourvopoulos: Multi-parameter on-line coal bulk analysis. *The Journal of Coal Quality* (az International Symposium on On-line analysis of coal, 1993 alapján), 12/2-3 (1993) 96-101.
- [76] J. Csikai: Nuclear data for geology and mining. *Nuclear Data for Science and Technology* (Ed.: S. M. Qaim), Proceedings of an International Conference, held at the Forschungszentrum Jülich, Fed. Rep. Of Germany, 13-17 May 1991.
- [77] G. Vourvopoulos, F.J. Schultz: A pulsed fast-thermal neutron system for the detection of hidden explosives. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 79 (1993) 585-588.
- [78] George Vourvopoulos: Accelerator based techniques for contraband detection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 89 (1994) 388-393.
- [79] J. Csikai, E. Hussein, U. Rosengard (Editors): Applications of Nuclear Techniques to Anti-personnel Landmine Identification. *Applied Radiation and Isotopes* 61/1 (2004) 1-79.
- [80] Z.Y. Zhang, J.H. Yang, H. Ouyang, Z.J. Li, Z.F. Chai, J. Zhu, J.Z. Zhao, Z.S. Yu, J. Wang: Study of trace impurities in heroin by neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 262/1 (2004) 295-297.
- [81] J.E. Eberhardt, S. Rainey, R.J. Stevens, B.D. Sowerby, J.R. Tickner: Fast neutron radiography scanner for the detection of contraband in air cargo containers. *Applied Radiation and Isotopes* 63/2 (2005) 179-188.
- [82] E. Zuccato, C. Chiabrandò, S. Castiglioni, D. Calamari, R. Bagnati, S. Schiarea, R. Fanelli: Cocaine in surface waters: A new evidence-based tool to monitor community drug abuse.

-
- Environmental Health: A Global Access Science Source 4 (2005) 14-es számú cikk.
- [83] E. Zuccato, S. Castiglioni: Illicit drugs in the environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 367/1904 (2009) 3965-3978.
- [84] A. Cecinato, C. Balducci, V. Budetta, A. Pasini: Illicit psychotropic substance contents in the air of Italy. *Atmospheric Environment* 44/19 (2010) 2358-2363.
- [85] F. Hernández, M. Ibáñez, R. Bade, L. Bijlsma, J.V. Sancho: Investigation of pharmaceuticals and illicit drugs in waters by liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* 63 (2014) 140-157.
- [86] X. Chen: Simultaneous determination of four designer drugs and their major metabolites by liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences* 992 (2015) 1-7.
- [87] M.D. Hargreaves, K. Page, T. Munshi, R. Tomsett, G. Lynch, H.G.M. Edwards: Analysis of seized drugs using portable Raman spectroscopy in an airport environment - A proof of principle study. *Journal of Raman Spectroscopy* 39/7 (2008) 873-880.
- [88] A.H. Grange, G.W. Sovocool: Detection of illicit drugs on surfaces using direct analysis in real time (DART) time-of-flight mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 25/9 (2011) 1271-1281.
- [89] P. Bach, J.L. Ma, D. Froment, J.C. Jaureguy: Chemical weapons detection by fast neutron activation analysis techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 79 (1993) 605-610.
- [90] F.D. Brooks, A. Buffler, M.S. Allie, K. Bharuth-Ram, M.R. Nchodu, B.R.S. Simpson: Determination of HCNO concentrations by fast neutron scattering analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 410 (1998) 319-328.
- [91] A. Buffler, F.D. Brooks, M.S. Allie, K. Bharuth-Ram, M.R. Nchodu: Material classification by fast neutron scattering. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 173 (2001) 483-502.
- [92] F.D. Brooks, M. Drog, F.D. Smit, C. Wikner: Detection of explosive remnants of war by neutron thermalization. *Applied Radiation and Isotopes* 70/1 (2012) 119-127.

-
- [93] P.P. Gokhale, E.M.A. Hussein: A ^{252}Cf neutron transmission technique for bulk detection of explosives. *Applied Radiation and Isotopes* 48/7 (1997) 973-979.
- [94] S. Pesente, G. Nebbia, M. Lunardon, G. Viesti, D. Sudac, K. Nad, S. Blagus, V. Valković: Detection of hidden explosives by using tagged neutron beams with sub-nanosecond time resolution. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 531/3 (2004) 657-667.
- [95] E.T.H. Clifford, J.E. McFee, H. Ing, H.R. Andrews, D. Tennant, E. Harper, A.A. Faust: A militarily fielded thermal neutron activation sensor for landmine detection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 579/1 (2007) 418-425.
- [96] I. ElAgib, N. Elsheikh, H. AlSewaidan, F. Habbani: Monte-Carlo simulations of elastically backscattered neutrons from hidden explosives using three different neutron sources. *Applied Radiation and Isotopes* 67/1 (2009) 39-45.
- [97] M.N. Nasrabadi, F. Bakhshi, M. Jalali, A. Mohammadi: Development of a technique using MCNPX code for determination of nitrogen content of explosive materials using prompt gamma neutron activation analysis method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 659/1 (2011) 378-382.
- [98] J.C. Oxley, J.L. Smith, E. Bernier, J.S. Moran, J. Luongo: Hair as forensic evidence of explosive handling. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 34/4 (2009) 307-314.
- [99] I. Doroftei, Y. Baudoin: A concept of walking robot for humanitarian demining. *Industrial Robot* 39/5 (2012) 441-449.
- [100] Y. Kabessa, O. Eyal, O. Bar-On, V. Korouma, S. Yagur-Kroll, S. Belkin, A.J. Agranat: Standoff detection of explosives and buried landmines using fluorescent bacterial sensor cells. *Biosensors and Bioelectronics* 79 (2016) 784-788.
- [101] A. Papp, J. Csikai: Lateral flux distributions of thermal and epithermal neutrons around a Pu-Be source. *Acta Physica Debrecina* 43 (2009) 10-14.
- [102] A. Papp, J. Csikai: Studies on the properties of an epithermal-neutron hydrogen analyzer. *Applied Radiation and Isotopes* 68 (2010) 1677-1681.

-
- [103] A. Papp, J. Csikai: Flux albedo of neutrons with thermal and 1.45 eV energies. *Acta Physica Debrecina* 46 (2012) 123-131.
- [104] A. Papp: Studies on the detection of concealed objects using the neutron reflection method. *Applied Radiation and Isotopes* 75 (2013) 26-29.
- [105] A. Papp, J. Csikai: Use of neutron albedo to detect plastic explosives. *Acta Physica Debrecina* 47 (2013) 137-150.
- [106] Solt György: Valószínűség-számítás. Műszaki Kiadó, Budapest, 2007.
- [107] A. Papp, J. Csikai: Use of thermal neutron reflection method for chemical analysis of bulk samples. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 758 (2014) 26-29.
- [108] www.chemspider.com