



**Neutron indukált magreakciók differenciális és integrális  
hatáskeresztmetszeteinek vizsgálata**

doktori (PhD) értekezés

Dóczi Rita

Kossuth Lajos Tudományegyetem  
Debrecen, 1998.

Ezen értekezést a KLTE Fizika doktori program “Magfizika” alprogramja keretében készítettem 1994-1998 között és ezúton benyújtom a KLTE doktori Ph.D. fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 1998.

Dóczi Rita  
jelölt

Tanúsítom, hogy Dóczi Rita doktorjelölt 1994-1998 között a fent megnevezett doktori alprogram keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglaltak a jelölt önálló munkáján alapulnak, az eredményekhez önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az értekezés elfogadását javaslom.

Debrecen, 1998.

Dr. Csikai Gyula  
témavezető

## Köszönetnyilvánítás

Őszinte köszönetemet fejezem ki témavezetőmnek, Dr. Csikai Gyula akadémikusnak, hogy lehetővé tette e dolgozat elkészítését, és mindvégig értékes megjegyzésekkel és hasznos tanácsokkal irányította munkámat, sőt több kísérletben személyesen is részt vett.

Köszönettel tartozom Dr. Syed M. Qaim-nak, a jülichi Magkutató Intézet (KFA-INC) munkatársának, akitől a külföldi munkám során kaptam sok-sok szakmai segítséget. A németországi kísérletekre a TEMPUS program keretében nyílt lehetőségem két ízben is.

Köszönetet mondok Dr. Cs. Buczkó Margit egyetemi docensnek, aki a munka kezdeti szakaszán látott el tanácsokkal és segítséggel.

A KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék valamennyi tanárától mindig hathatós támogatást kaptam, ezt külön megköszönöm Dr. Szegedi Sándor adjunktusnak, Dr. Várnagy Mihály docensnek, Dr. Sudár Sándor adjunktusnak és Dr. Cserpák Ferenc adjunktusnak.

A Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézetében végeztük a ciklotronos besugárzásokat. Ezekhez a mérésekhez Dr. Fenyvesi András biztosított minden lehetőséget.

A technikai segítséget Liszka Annamáriának, Bolyán Dezsőnek, Szegedi Jánosnak, Stephan Spellerbergnek, valamint a jülichi kompakt ciklotron és a MTA ciklotron operátorainak köszönöm meg.

## Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
2. Az aktivációs módszer.....	5
3. Az $^{89}\text{Y}$ izotópon indukált neutron reakciók vizsgálata.....	9
A) Hosszú felezési idejű végtermékekre vezető reakciók hatáskeresztmetszeteinek mérése.....	9
B) Rövid felezési idejű végtermékekhez vezető magreakciók hatáskeresztmetszetének mérése.....	24
C) A gerjesztési függvények ellenőrzése integrális adatokkal.....	29
4. Neutronindukált magreakciók hatáskeresztmetszetének szisztematikus vizsgálata nagyszámú izotópon.....	35
5. Az (n,p) és (n,a) reakciók szisztematikájának vizsgálata 14 MeV körüli energiáknál.....	52
6. Az eredmények összefoglalása.....	79
7. Summary.....	81
8. Irodalomjegyzék.....	85
9. Függelék.....	105

Neutron indukált magreakciók differenciális és integrális  
hatáskeresztmetszeteinek vizsgálata

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében  
a fizika tudományában

Írta: Dóczi Rita okleveles kémia-fizika szakos tanár

Készült a Kossuth Lajos Tudományegyetem fizika doktori programja  
(magfizika alprogramja) keretében.

Témavezető: Dr. Csikai Gyula

Elfogadásra javaslom: 1998.

Jelölt a doktori szigorlatot 1997. szeptember 29-én eredményesen letette:  
a bizottság elnöke: Dr. Koltay Ede

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Dr.

Dr.

Jelölt az értekezést 1998. ....-n sikeresen megvédte:

A védési bizottság elnöke: Dr.

## 1.

**Bevezetés**

Eddigi munkám mindvégig kísérleti jellegű volt, illetve kísérleti adatok rendszerezésén alapult. Dolgozatomban ismertetem célkitűzéseimet és az elért tudományos mérési eredményeimet, ugyanakkor feladatom az is, hogy utaljak a már ismert, általam is alkalmazott kutatási módszerekre és a munkámmal összefüggő nagy mennyiségű szakirodalomról is áttekintést adjak.

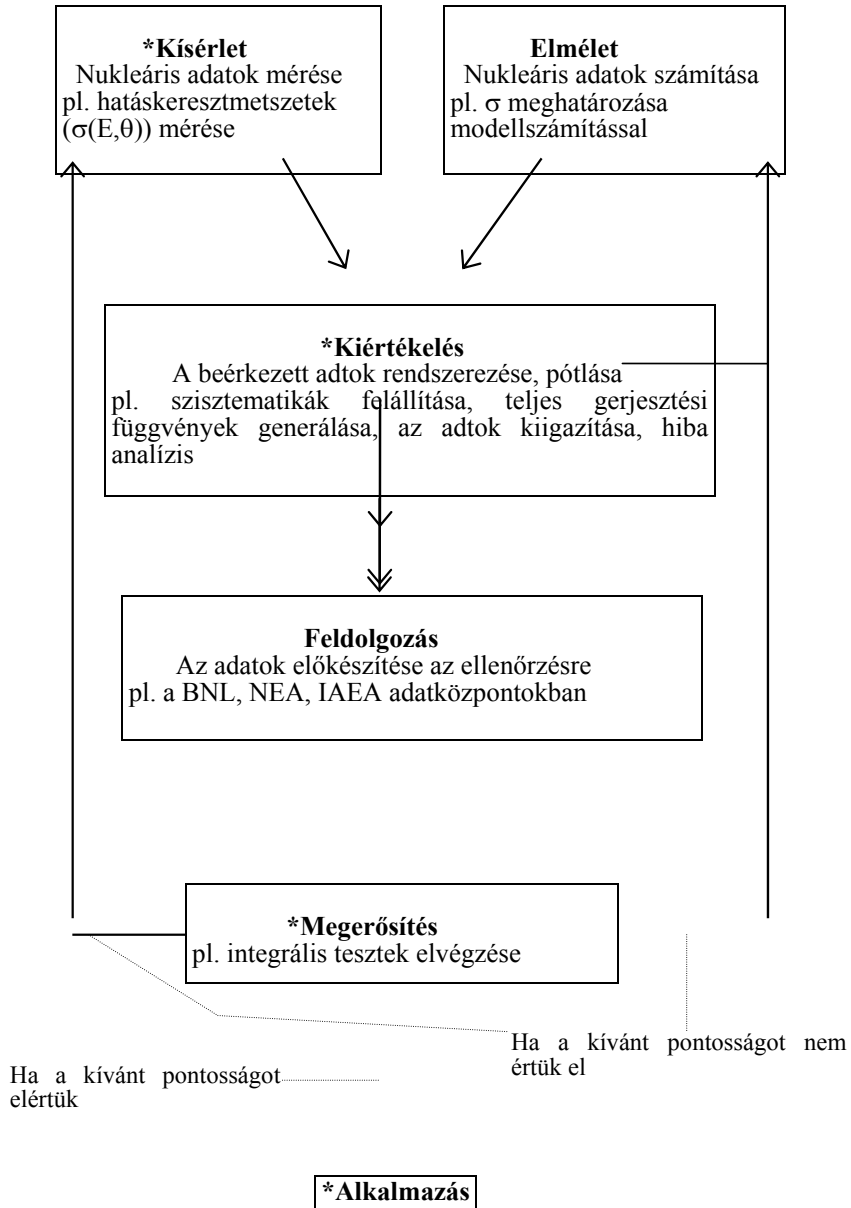
A különféle nukleáris adatok meghatározása napjaink fontos feladata. A gyakorlati felhasználásig hosszú út vezet, ezt az 1.1. ábrán mutatom be. A sémán látható folyamatba több (\*-gal jelölt) ponton is bekapcsolódtam:

1. A különféle magreakciók hatáskeresztmetszeteinek vizsgálata több évtizedes múltira tekint vissza. Nagyszámú mérési adat halmozódott fel, azonban az irodalmat áttekintve láthatjuk, hogy ezek gyakran ellentmondásosak és hiányosak. Olykor bizonyos energiatartományban nem találunk adatot, máskor teljesen hiányzik egy-egy reakció leírása. Ez utóbbi eset mindig olyankor fordul elő, ha a mérés valamilyen nehézségbe ütközik (pl. túl hosszú felezési idejű a termék, bonyolult bomlássémával állunk szemben, nagy a mátrix aktivitása, stb.). Ekkor a fizikus izgalmas feladata, hogy mindig új eljárásokat dolgozzon ki, illetve optimalizálja a kísérleti körülményeket.

Dolgozatomban a következő, nagy gyakorlati jelentőséggel is bíró reakciótípusokkal foglalkozok:  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$ ,  $(n,2n)$ ,  $(n,n'\gamma)$ . A szakma igényeitől függően gerjesztési függvényeket mértem ki a reakció küszöbenergiájától kb. 15 MeV-ig terjedő neutronenergia tartományban; illetve 8-12 MeV energiatartományban határoztam meg hatáskeresztmetszeteket, hiszen legtöbbször ez az a tartomány, ahol a gerjesztési függvények kiegészítésre szorulnak.

Manapság igen széleskörűen kerülnek felhasználásra a hatáskeresztmetszet adatok. Jelentős energiagondjainkat csökkentik jelenleg a hasadási reaktorok, az új típusú, fűziós reaktorok tervezése sok nukleáris adat meghatározását kívánja, az elemek mintegy harmada jön számításba a reaktor lehetséges szerkezeti anyagaként [1.1]. A fűziós reaktorokban a neutronok energiája közelítően néhány keV és 14 MeV közé esik, így méréseim alkalmazhatók. A hatáskeresztmetszet-adatokat ezenkívül egyre inkább felhasználják más tudományágak, így az egyes adatok asztrofizikai, geológiai, kozmokémiai, kémiai analitikai, dozimetriai vagy orvosi alkalmazást nyerhetnek.

1.1. ábra. A nukleáris adatok feldolgozásának menete



A kísérleti eredményeket összehasonlítottam a modellszámítások útján nyert információkkal. Így ellenőrizhetjük az elméletek alkalmazhatóságát.

Ebből a szempontból különösen jelentősek azon reakciók hatáskeresztmetszeteinek mérése, ahol a reakciótermék metastabil állapotban keletkezik, ugyanis ezekre az esetekre ritkán voltak jól alkalmazhatóak a modellek. Dolgozatomban két magreakció esetén foglalkozok a keletkező metaállapot/alapállapot izomer viszonyának meghatározásával.

2. Sok-sok nemzetközi konferencián megfogalmazódott az igény új hatáskeresztmetszet-adatokra az atomenergia békés célú felhasználása kapcsán. Már a hatvanas években felfigyeltek arra, hogy a magreakciók hatáskeresztmetszeteire bizonyos szisztematikus viselkedés jellemző. A szisztematikák felállításával mód nyílik arra, hogy egyes nem- vagy nehezen mérhető hatáskeresztmetszet-adatokat megbecsüljünk. Ez a dolgozat az (n,p) reakciókra 14 MeV bombázó neutronenergiánál felállított szisztematikákról szól részletesen.
3. Új eredményekről szeretnék beszámolni a különféle adatbankok (ENDF, FENDL, BROND) ellenőrzése terén. Integrális tesztek végzettem, ez folytonos neutronspektrumra átlagolt hatáskeresztmetszetek kísérleti meghatározását jelenti. Az unfolding módszerrel meghatározott neutronspektrumokra ugyanakkor kiszámítottam az adatbankok által ajánlott gerjesztési függvények alapján is az integrális értékeket. A kísérletek és a számítások összehasonlítása révén az adatbankok jóságának ellenőrzésére nyílt lehetőség, illetve az egyes reakciókra vonatkozóan kiválasztottam azokat a bankokat, melyek felhasználása a továbbiakban a leginkább javasolható.
4. Ezen eredményeknek magam is felhasználójává válok, hiszen a továbbiakban doziméter reakcióként fogom használni az ellenőrzött adatokat

Az itt felsorolt munkákhoz a kísérleti módszerek széles skáláját alkalmaztam: a besugárzások ciklotron és neutrongenerátor segítségével történtek, különböző típusú detektorokat használtam a béta- és a gamma aktivitás méréséhez, radiokémiai elválasztási módszereket tanulmányoztam és használtam fel.

A következő fejezetben röviden leírom az aktivációs módszer lényegét, melynek használata végigkísérte munkámat. A konkrét megvalósításra vonatkozó részleteket illetve a berendezéseket a további fejezetekben ismertetem, melyek témakörei a következők:



a./ az  $^{89}\text{Y}$  neutronindukált reakcióinak vizsgálata

- hosszú felezési idejű végtermékekre vezető reakciók hatáskeresztmetszeteinek mérése
- rövid felezési idejű végtermékekre vezető reakciók hatáskeresztmetszeteinek mérése
- a gerjesztési függvények ellenőrzése integrális tesztekkel

b./ más izotópok neutronindukált magreakcióinak vizsgálata

c./ az (n,p) és (n, $\alpha$ ) reakciók szisztematikájának vizsgálata 14 MeV neutronenergia környékén.

A dolgozat magyar és angol nyelvű összefoglalóval folytatódik, majd irodalomjegyzékkel és a publikációkat tartalmazó függelékkel zárul. Az itt felsorolt a./, b./ és c./ témakörök egymástól függetlenül is áttekintést adnak a feldolgozott témákról, ezért néhány referencia ismétlésre kerül egy-egy későbbi fejezethez tartozó irodalomjegyzékben is.

## 2.

**AZ AKTIVÁCIÓS MÓDSZER**

Az aktivációs módszer lényege, hogy az analizálandó mintát nukleáris részecskékkel, legtöbbször neutronokkal sugározzák be. Ennek hatására magreakciók jönnek létre. Ha a keletkezett reakciótermékek radioaktívak, a radioaktív sugárzás mérésével kvalitatív és kvantitatív meghatározások végezhetők el. Jelen esetben a különféle magreakciók hatáskeresztmetszetének ( $\sigma$ ) mérésével foglalkozok.

A módszer előnye, hogy az aktiválás és a mérés térben és időben elválí, így a direkt háttérsugárzás kiküszöbölhető, egyszerre több minta vagy több energia vizsgálható igen nagy pontossággal.

A besugárzáshoz jól meghatározott alakú, tömegű, izotópösszetételű, homogén, kémiaiilag stabil mintákról kell gondoskodni.

A vizsgált reakcióból származó aktivitás T ideig tartó bombázás után

$$A_0 = N\Phi\sigma(1 - e^{-\lambda T}), \quad /2.1/$$

ahol N a kiindulási izotóp-atommagok száma, vagyis

$$N = n f 6 \cdot 10^{23}, \quad /2.2/$$

(ahol  $n = m/M$ , ha az M moláris tömegű elem m tömeggel képviselteti magát a mintában és f az izotóparány).

$\Phi$  az  $E_n$  energiájú neutronok fluxusa ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

$\sigma$  a reakció hatáskeresztmetszete ( $\text{cm}^2$ )

$\lambda$  a végmag bomlási állandója

Az  $N\Phi\sigma$  mennyiség egyenlő a maximálisan elérhető aktivitással. 4-5 felezési ideig tartó besugárzás után az  $(1 - e^{-\lambda T})$  telítési faktor közel egységnyi, ennél tovább nem érdemes a besugárzást folytatni.

A /2.1/ egyenlet érvényességének egyik feltétele, hogy a mintát időben állandó (és homogén) neutronfluxus érje. Méréseim során kísérletileg regisztráltam a fluxus változását és a számításoknál a következőkben leírt fluxuskorrekciót alkalmaztam:

Osszuk a T besugárzási időt N db egyenlő intervallumra,  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ , amely intervallumokon belül állandónak vehető a fluxus, illetve bármely, ezzel arányosnak vehető számlálási sebesség.

Ekkor a korrigált aktivitást megkapjuk, ha a mért aktivitást a következő  $K_\Phi$  faktorial [2.1, 2.2] szorozzuk meg:

$$K_\Phi = \frac{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi_i\right) (1 - e^{-\lambda T})}{\sum_{i=1}^N \Phi_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda(T-t_i)}} \quad /2.3/$$

A fluxuskorrekción kiemelkedően nagy jelentőségű, ha a reakciótermék rövid felezési idejű, illetve ha a termékünk és a monitorreakció termékének felezési ideje között nagyobb eltérés mutatkozik. A fluxus meghatározásához ugyanis minden esetben monitorfóliákat alkalmaztam, vagyis tulajdonképpen relatív hatáskeresztmetszet-mérés történt egy ismert gerjesztési függvényű magreakció révén.

A besugárzást követően a keltett aktivitás exponenciálisan csökken az idő függvényében:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad /2.4/$$

Ha a mérés a bombázás befejezését követő  $t_1$  időpillanattól  $t_2$ -ig tart, azt várjuk, hogy a detektált bomlások száma:

$$N = \int_{t_1}^{t_2} N\Phi\sigma(1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t} = \frac{N\Phi\sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t_1} (1 - e^{-\lambda(t_2 - t_1)}), \quad /2.5/$$

ahol  $t_1$  a hűtési idő,  $t_2 - t_1 = t_m$  pedig a mérés időtartama.

Emellett figyelembe kell még venni

- a detektor hatásfokát,
- az észlelt részecskére vonatkozó elágazási intenzitást.

A méréseim során még a következő, el nem hanyagolható korrekciókat alkalmaztam:

1. A minta belsejében a  $\gamma$ -sugárzás gyengülése, vagyis az önabszorpciós korrekció, melynek kiszámítását minden gamma-sugárzásméréssel kapcsolatban elvégeztem. Nagy  $\gamma$ -energiáknál gyakran még vastagabb minták esetén is elhanyagolható az értéke, míg 300 keV alatt kifejezetten jelentőssé válik. A következő összefüggést [2.3] használtam:

$$K_{\text{öa}} = \frac{1}{\mu d} (1 - e^{-\mu d}), \quad /2.6/$$

ahol  $\mu$  a gamma sugárzás energiájától és a minta anyagi minőségétől függő abszorpciós koeficiens,  $d$  pedig a minta vastagsága. A béta-számlálások esetén úgynevezett vékony minta preparációval csökkentettem minimálisra az önabszorpciót.

2. A mérőberendezésre jellemző holtidő korrekciót [2.3] az aktív mérési idő és a valódi idő hányadosaként adtam meg. A hűlési idő és a mérési idő megválasztása miatt a holtidő még a rövid felezési idejű minták mérésénél is konstansnak volt tekinthető a számlálás alatt.
3. A gamma mérések koincidenca korrekciói [2.3]:

a./ Véletlen koincidenca korrekciót nem kellett figyelembe venni a minták kis aktivitása miatt a hatáskeresztmetszetek meghatározása során, azonban a detektor hitelesítésénél elkerülhetetlennek bizonyult ennek kimérése egy impulzusgenerátor segítségével a gamma sztenderdek erőssége és a detektortól való kis távolság miatt.

b./ Valódi koincidenca korrekció kiszámítása a legtöbb esetben elengedhetetlen volt, hiszen a detektorhoz közel, gyakran annak felületén kellett mérni, ahol a totális hatások értéke így viszonylag nagy. Bizonyos bomlássémák esetén a spektrométer véges időbeli felbontóképessége miatt jönnek létre a valódi koincidenkiák. Ha két foton van, egymással kaszkádban ezen veszteség miatt az  $N$  db  $E_1$  energiájú foton helyett csak

$$N' = N(1 - \eta_t(E_2)) \quad /2.7/$$

darabot észlelünk, ahol  $\eta_t(E_2)$  a 2. vonalra értendő totális detektálási hatások, ha a fotonok szögkorrelációjától eltekintünk. Összetettebb esetben, amikor a vizsgált gamma-átmenet több bomlási ágon keresztül van kaszkádban más fotonokkal, a [2.3] irodalomban megtalálható, általános esetre vonatkozó képlettel számítottam.

A neutronindukált magreakciók hatáskeresztmetszeteinek pontos méréséhez számunkra kiemelkedő fontosságú a jól ismert spektrumú, megfelelő gyorsneutron-források kiválasztása. Ehhez többféle reakción alapuló kvázi-monoenergiás neutronforrás áll rendelkezésre. A legfontosabb reakciók és általános jellemzésük a 2.I. táblázatban kerültek összefoglalásra [2.5].

**2.I. táblázat.** Kvázi-monoenergiás neutronforrásoknál alkalmazott magreakciók

Reakció	Reakcióhő (MeV)	Neutronenergia-tartomány (MeV) *	Target
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	-1,64	0,2-1	Li
${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$	-0,76	0,7-3	TiT; T <sub>2</sub> gáz
${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$	+3,27	3-8; 8-12	TiD; D <sub>2</sub> gáz
${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$	+17,59	14-20	TiT; T <sub>2</sub> gáz
${}^2\text{H}({}^3\text{H},n){}^4\text{He}$	+17,59	14-26	D <sub>2</sub> gáz

\* Az energia a kibocsátás szögétől függ.

Megjegyzés [D.R.1]:

Az itt felsorolt reakciók közül a  ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$  és az  ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$  előnyeit használtam ki.

Az általam is alkalmazott ciklotronok a  ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$  magreakción keresztül képesek kb 4-12 MeV energiatartományban nagy hozammal kvázi-monoenergiás neutronnyalábot szolgáltatni. A vizsgálatokhoz mára már olyan gázcéltárgy-rendszert fejlesztettek ki, melynél a háttérneutronok hozama elhanyagolható.

A fenti D-D és D-T reakciók másrészt a nagy hagyományokkal rendelkező és könnyebben kezelhető neutrongenerátorokban kerültek alkalmazásra, ahol is a reakciók rendre 2,5 MeV illetve 14 MeV körüli energiájú neutronokat adnak.

## 3.

AZ  $^{89}\text{Y}$  IZOTÓPON INDUKÁLT NEUTRONREAKCIÓK VIZSGÁLATA

## A/ Hosszú felezési idejű végtermékekre vezető reakciók

## hatáskeresztmetszeteinek mérése

A munkám során a legszélesebbkörűen az ittriummal foglalkoztam. Ez egy monoizotópos elem, a neutronszámot tekintve mágiikus ( $N = 50$ ). Az ittriumot atomreaktorokban alkalmazzák, így különösen fontos a neutronindukált reakciók vizsgálata. A következő gerjesztési függvényeket mértem:  $^{89}\text{Y}(n,2n)^{89}\text{Y}$ ;  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$ ;  $^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$ ;  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}}\text{Rb}$ ;  $^{89}\text{Y}(n,n'\gamma)^{89\text{m}}\text{Y}$ .

A két utóbbi, igen rövid felezési idejű, izomer állapotú végtermékekhez vezető reakcióval külön fejezetben foglalkozok.

A vizsgált hatáskeresztmetszet adatok az 5-13 MeV neutronenergia-tartományban igen hiányosak, vagy, ha léteznek, nagyon szórnak [3.1; 3.2]. Ez gyakori jelenség, ha a reakcióterméknek valamilyen szokatlan bomlási tulajdonsága van, például nagyon rövid vagy nagyon hosszú a felezési ideje, béta- vagy alfa-bomlását nem kíséri gamma emisszió stb. Némely ilyen különleges esetre megoldást jelent a termékek radiokémiai elválasztása, ami után a mintából igen vékony forrás készíthető, így az önabszorpciót minimálisra csökkenthetjük, és ez lehetővé teszi az alfa-és béta-számlálást éppúgy, mint a röntgenspektroszkópiai kiértékelést.

A vizsgált reakciók bomlási adatait a 3.I. táblázatban tüntettem fel [3.3; 3.4].

**3.I. táblázat.** A vizsgált Y-reakciók bomlási adatai

Magreakciók	Reakcióhő (MeV)	Felezési idő (nap)	Bomlásmód	Maximális $\beta^-$ energia (MeV)	$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma$ (%)
$^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$	+0,69	18,66	$\beta^-$ (100%)	1,77	1077	8,8
$^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$	-0,71	50,55	$\beta^-$ (100%)	1,49		
$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	-11,47	106,61	EC (>99%)	1,79	898	92,7
			$\beta^+$ (0,21%)		1836	99,4

A reakcióhőt a [3.3]-as irodalomban közölt kötési energiák alapján számítottam ki.

Az (n,p) reakció béta bomló, a hatáskeresztmetszet egyáltalán nem határozható meg gamma-spektroszkópiai módszerekkel. Az (n, $\alpha$ ) termék béta bomlásához gyenge gamma sugárzás is járul, míg az (n,2n) reakció esetén igen szignifikáns gamma sugárzást mérhetünk. Így az (n,2n) reakció hatáskeresztmetszetét a legkönnyebb meghatározni, sok ide vonatkozó irodalmi adatot is találhatunk [3.1; 3.2; 3.5; 3.6]. Az (n,p) és az (n, $\alpha$ ) reakciók esetében viszont az adatbázis szűkös [3.5]. Az (n,p) reakcióra egyrészt 14-15 MeV környékén találhatunk néhány mérési adatot [3.7; 3.8], másrészt két publikációban gerjesztési függvényt is megadnak [3.9; 3.10], de az eredmények eltérőek. Az (n, $\alpha$ ) reakcióról több aktivációs hatáskeresztmetszet-mérés jelent meg 14-15 MeV környékén [3.8; 3.11; 3.13], de az eredmények itt is ellentmondásosak. Az (n,p) reakcióhoz hasonlóan a két publikált gerjesztési függvény [3.9; 3.10] sem mutat egyezést. Összhangot fedezhetünk fel viszont a 14,8 MeV energiánál kapott tömegspektrometriai eredmény [3.14] és az alfa részecskeszámlálással kapott eredmény [3.15] között. Az adatok hiánya és szórása miatt nagyon időszerűvé vált az (n, $\alpha$ ) és (n,p) reakciók radiokémiai vizsgálata.

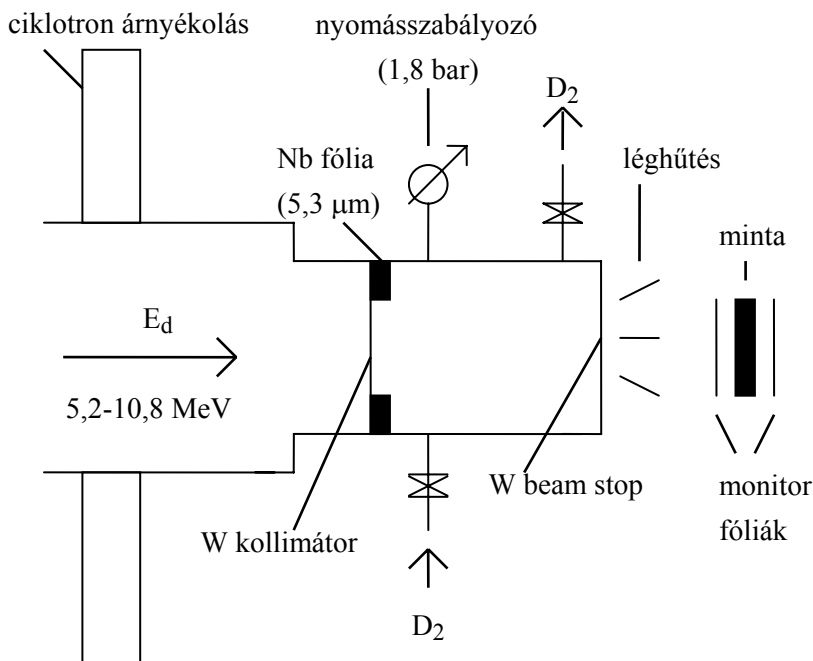
A vizsgálatban Riccarda Klopries és magam vettünk részt a Jülichi Kutatóközpont Magkémiai Intézetében. Hasonló módszereket alkalmazva, de különböző energiákon végeztük a kísérleteket. A gerjesztési függvényt 14 MeV neutronenergia környékén Debrecenben, neutrongenerátoros besugárzás révén egészítettem ki. A reakciók hatáskeresztmetszeteit a bevezető részben ismertetett aktivációs módszerrel határoztam meg. Az általános leírást itt egészítem ki a mérésre vonatkozó konkrét információkkal.

### A minták és a besugárzás

Céltárgyként nagy tisztaságú  $Y_2O_3$ -port használtam (99,999% Fluka Chemie). 4 gramm porból 10 tonna/cm<sup>2</sup> nyomással korongot préseltem, melynek átmérője 2,0 cm, a vastagsága pedig 0,43 cm volt. A korongot vékony alumínium tokba zártam, hogy a minta megőrizze mechanikai stabilitását. Monitorként nagy tisztaságú (Goodfellow) alumínium illetve vas fóliát illesztettem a minta elé és mögé, melyek átmérője megegyezett az  $Y_2O_3$ -korong átmérőjével, vastagságuk pedig rendre 1mm illetve 0,50 mm volt. A neutronbesugárzást Jülichben végeztem. A kvázi monoenergetikus neutronokat egy változtatható energiájú kompakt ciklotron (CV28) szolgáltatta  $D_2$  gáztarget segítségével a  ${}^2H(d,n){}^3He$  reakció ( $Q = 3,269$  MeV) révén. A besugárzás geometriáját a 3.1. ábrán mutatom be. A neutronforrás részletes leírását a [3.16] irodalomban találhatjuk meg. A ciklotronból érkező deuteronnyaláb egy

5,3  $\mu\text{m}$  Nb ablakon keresztül lép be a  $\text{D}_2$  gázcellába, amely 3,7 cm hosszú, 4,0 cm átmérőjű és  $1,8 \cdot 10^5$  Pa nyomású  $\text{D}_2$  gázt tartalmaz; a gázban veszít energiájából, a maradék energiát pedig a W nyaláb-megfogóban (beam stop) adja le, amelyet levegővel hűtenek.

**3.1. ábra.** A jülich-i kompakt ciklotron  $\text{D}_2$  gáztargetének sémája



A besugárzandó mintát az érkező deuteron-nyaláb által meghatározott egyenes irányban ( $0^\circ$ ) rögzítettem, a beam stop-tól 0,5-1 cm távolságra. A deuteron-energiát 5,2 MeV és 10,8 MeV között változtatva 7,8 MeV-13,3 MeV energiájú neutronokat nyertem. 2  $\mu\text{A}$  és 4  $\mu\text{A}$  közötti targetáramokat sikerült elérni. A besugárzások 1,5-7 óráig tartottak.

Minden olyan esetben, amikor 7 MeV feletti deuteron-energiát ( $E_n \geq 9,5 \text{ MeV}$ ) alkalmaztam, két besugárzást végeztem azonos geometriában. Az egyik esetben a targetból kiengedtem a deuteron-gázt. Ez az úgynevezett „gas out” besugárzás azt a célt szolgálja, hogy meghatározhassam a háttérneutronok okozta aktivitást, amely neutronok a deutériumnyaláb különféle szerkezeti anyagokkal (pl. Nb ablak, kollimátor, 'beam stop') való reakciójából származnak. A neutronháttér



észrevehetően csökkenthető, ha volfram kollimátort és `beam stop`-ot alkalmazunk [3.17].

A mérésekből kiderült, hogy a `gas out` korrekciót 7 MeV neutronenergia felett szükségszerű elvégezni alacsonyabb küszöbenergiájú reakciók esetén, pl. (n, $\alpha$ ), (n,p) reakciókra.

A 13,8MeV-14,7MeV neutronenergia-tartományba eső besugárzásokat Debrecenben végeztem a KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék nagyáramú generátoránál a D-T reakció felhasználásával.

Az alumíniumtokba zárt Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-mintákat valamint az alumínium monitorfóliákat a jülich-i mintákkal azonos módon és azonos méretűre készítettük. Három mintát használtunk, amelyek két oldalához monitorfóliákat illesztettünk, és a minták a bejövő deuteronnyaláb irányához képest 0°, 90° és 120°-os szögben helyezkedtek el. A körív alakú mintatartó sugara 6,5 cm volt. A besugárzást 6 órán át végeztük.

### A neutronenergia és a neutronfluxus meghatározása

A jülich-i D-D neutronforrás esetében az átlagos neutronenergiákat és azok hibáit Monte Carlo számítást alkalmazó NEUT nevű számítógépes programmal kaptam meg minden egyes mintára [3.18]. Az energia kiszámításánál a program figyelembe veszi a deuteronok energiavesztését, energia- és szög szerinti szórását a nióbbium-ablakban, a neutrontermelést a gáztérfogatban, valamint ezen <sup>2</sup>H(d,n)<sup>3</sup>He reakcióból származó neutronok szög szerinti eloszlását. Változó paraméterek: a minta vastagsága és átmérője, a deutériumgáz nyomása, a minta és a beam stop távolsága. A debreceni D-T neutronforrás esetében a megfelelő szögekhez tartozó energiák és hibáik a [3.19] irodalomból ismertek. A D-D neutronforrás használatakor a neutronfluxus meghatározására a <sup>56</sup>Fe(n,p)<sup>56</sup>Mn monitorreakciót használtam a teljes vizsgált energiatartományban, valamint az <sup>27</sup>Al(n, $\alpha$ )<sup>24</sup>Na reakciót a 8,5 MeV-13,3 MeV-ig terjedő energiatartományban. A monitorreakciók leglényegesebb adatait a 3.II. táblázatban foglaltam össze. A reakciókra vonatkozó hatáskeresztmetszet-adatokat az IRDF 90 számítógépes adatbázisából vettem [3.20].

### **3.II. táblázat.** A monitorreakciók legfontosabb jellemzői

Reakció	T <sub>1/2</sub>	E <sub><math>\gamma</math></sub>	I <sub><math>\gamma</math></sub>
<sup>56</sup> Fe(n,p) <sup>56</sup> Mn	2,58 h	487 keV	98,9%
		1811 keV	27,2%
<sup>27</sup> Al(n, $\alpha$ ) <sup>24</sup> Na	14,97 h	1369 keV	100%

A fluxus kiszámítására a háttérneutronok okozta aktivitás levonása után került sor (gas in/gas out korrekció). A két monitorreakció alapján kapott fluxusértékek 4-18%-kal tértek el egymástól; a legnagyobb eltérés az  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  reakció küszöbenergiájánál tapasztalható. Mivel az  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  monitorreakció hatáskeresztmetszete 10 MeV alatti neutronenergiánál gyorsan változik, a  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$  reakció használata kedvezőbb. Nagyobb neutronenergiák esetén a két monitor révén kapott fluxus átlagát vettem figyelembe. Így a fluxus  $1,6 \cdot 10^7$  és  $3,4 \cdot 10^7$   $\text{ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$  között változott. Egy adott energián a besugárzás ideje alatt a fluxus kevesebb, mint 3%-ot ingadozott. A fluxus állandóságát a targetben levő gáz nyomásának és a targetbe érkező  $\text{D}^+$  ionáram ellenőrzésével kísérem figyelemmel.

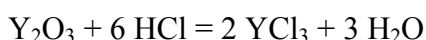
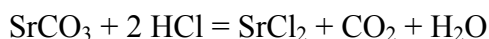
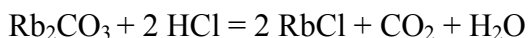
A D-T forrás esetében fluxusmérésre kizárólag az  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  monitorreakciót használtam. A besugárzás alatt a fluxus kismértékű változását egy  $\text{BF}_3$  számlálóval (long counter) regisztráltam; a kapott adatsort az előző fejezetben leírt fluxuskorrekció kiszámításához alkalmaztam. A fluxus  $1,44 \cdot 10^7$  és  $1,62 \cdot 10^7$   $\text{ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$  között változott.

### Radiokémiai elválasztás

Ha a mérendő izotópok sugárzása nem különíthető el egymástól illetve a mátrix vagy szennyezők sugárzásától, kémiai eljárást kell alkalmazni. Az aktiváció után minden kémiai analitikai elválasztási módszer alkalmazható. A magreakciók során igen kis mennyiségű termékek keletkeznek. Elkerülhető azonban a nehézkes mikroanalitikai meghatározás, ha a radioaktív mintához azonos kémiai tulajdonságú inaktív hordozót adunk. Így makromennyiségekkel is dolgozhatunk szubmikrogrammos mennyiségek helyett.

Jelen esetben a besugárzott  $\text{Y}_2\text{O}_3$  minta aktivitása főleg azoktól az ittrium, stroncium és rubídium radioizotópoktól ered, melyek az  $^{89}\text{Y}$  -ből rendre az (n,2n), (n,p), ill. (n, $\alpha$ ) reakciók révén keletkeztek.

A monitorfóliák és az alumínium tok eltávolítása után 30 mg  $\text{Rb}_2\text{CO}_3$  és 30 mg  $\text{SrCO}_3$  hordozóanyagot adtam a besugárzott  $\text{Y}_2\text{O}_3$  mintákhoz. A keveréket 10 M koncentrációjú sósavban oldottam fel:



Bepárlás után a keletkezett fém-kloridokból 1500 ml vizes oldatot készítettem, amelyet 80 °C-ra melegítettem. Tömény ammóniaoldat cseppenkénti hozzáadásával az ittrium  $\text{Y}(\text{OH})_3$  csapadék formájában vált le. Az ammóniát addig adagoltam, amíg az oldat pH értéke el nem érte a 11-et. A csapadékot centrifugálással különítettem el, 3-4 -szer mostam  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -ra nézve 2 m/m %-os, az ammóniát tekintve 10 m/m %-os oldattal.

Minden ülepítésnél a centrifugát egy percig működtettem 4000 1/s fordulatszámmal. A megmaradó tiszta oldatot eredeti térfogatának 10%-ára pároltam be, majd megismételve a műveleteket újabb ammónia hozzáadásával tökéletesítettem az itrium leválasztását.

A rubídiumot és stronciumot tartalmazó oldatot szárazra pároltam, majd a zavaróan nagy mennyiségben keletkezett  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -ot hevítés közben tömény salétromsavval elűztem. A maradékot kevés 8-9-es pH-jú, híg ammóniában oldottam fel, és az egészet kationcserélő oszlopban (DOWEX 50WX8, mesh 100-200) adszorbeáltattam. Az oszlop 15 cm hosszúságú és 1 cm átmérőjű volt, előzőleg 0,1 M  $\text{NH}_4\text{Cl}$ -oldattal kondicionáltam. 300 ml 0,5 M  $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$ -eluens segítségével először a rubídiumot távolítottam el, azután a 100 ml, 6 M  $\text{HNO}_3$ -eluenssel a stronciumot mostam ki az oszlopból [3.21]. A két frakciót külön lombikba gyűjtöttem. A kationokat az alábbi módszerekkel stabil vegyületekké kellett alakítani [3.22].

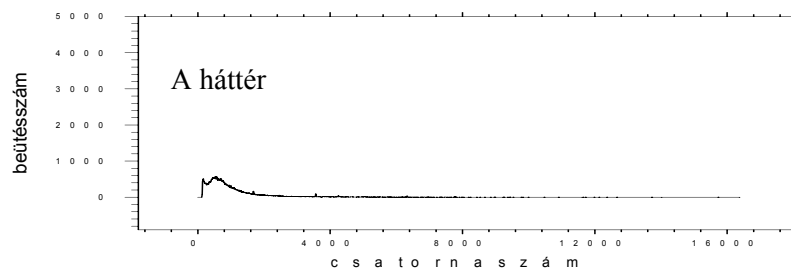
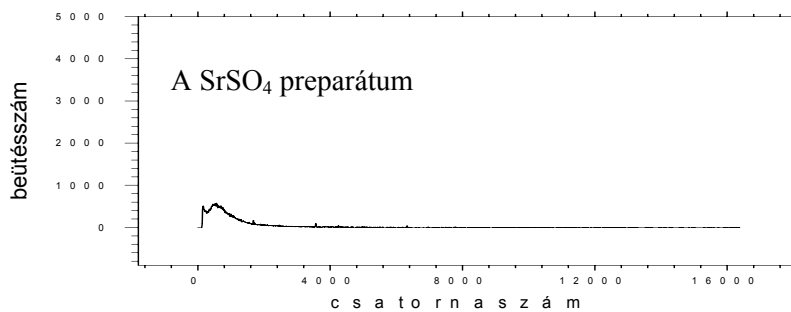
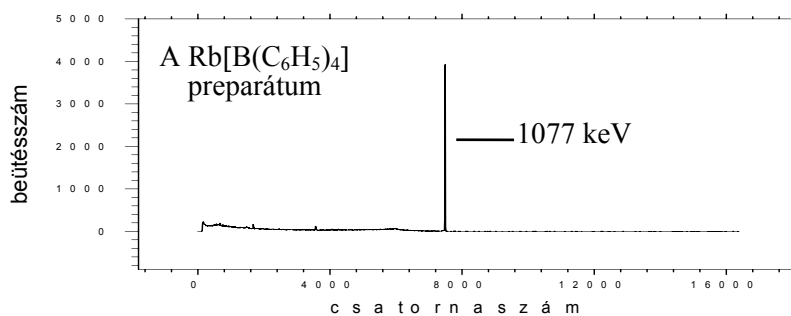
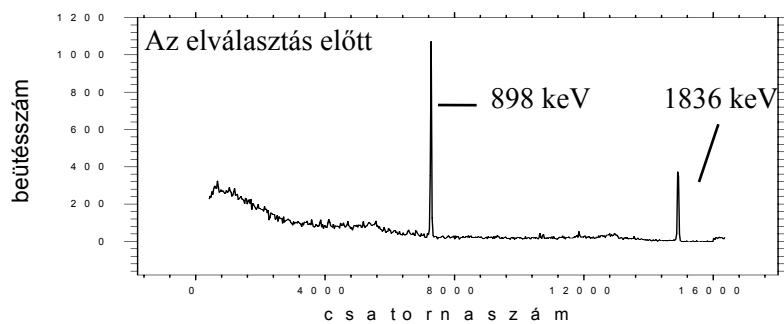
A stronciumot tartalmazó oldat nitráttartalmát bepárlás közben tömény sósavval űztem el. A maradékot 50 V/V %-os etanolban oldottam fel, majd 70 °C hőmérsékleten 0,1 M kénsavat adtam hozzá. A stroncium  $\text{SrSO}_4$  formájában kivált. A csapadékot ismét centrifugálással különítettem el, többször mostam 50 V/V %-os etanollal, végül 800 °C-os kemencében szárítottam ki.

A rubídiumot tartalmazó frakcióból az ammóniumsókat tömény salétromsav segítségével távolítottam el. A bepárolt anyagot mindig megmérve tömegállandóságig adagoltam a savat. A maradékot desztillált vízben oldottam fel, kevés sósavval a pH értéket 4-re állítottam be, és a hőmérsékletet 40 °C-ra emeltem. 0,02 M  $\text{Na}[\text{B}(\text{C}_6\text{H}_5)_4]$ -oldat segítségével a rubídiumtartalmat  $\text{Rb}[\text{B}(\text{C}_6\text{H}_5)_4]$  formájában választottam le. Ezt a csapadékot leszűrtem, a só telített oldatával mostam, végül 120 °C-on szárítottam.

A  $\text{SrSO}_4$ - és a  $\text{Rb}[\text{B}(\text{C}_6\text{H}_5)_4]$ -mintákat alumíniumlemezekre helyeztem; egyenletesen, vékony rétegben eloszlattam. A kémiai hozamot gravimetriás módszerrel határoztam meg. A rubídium esetében 60 %, míg a stronciumra 80 % körüli értékeket kaptam. A Rb-tartalom atomabszorpciós spektroszkópiával (AAS) is meghatározásra került, ennek eredménye alapján a gravimetriás hozamot korrigáltam.

A radiokémiai elválasztás eredményességét nyomon követhetjük a 3.2. ábrason: az elválasztás előtt csak az (n,2n) reakció termékének két intenzív vonalát figyelhetjük meg a  $\gamma$ -spektrumban, a nagy holtidő miatt más  $\gamma$ -vonal nem látható. Az elválasztás után feltűnik a  $^{86}\text{Rb}$  izotóp 1077 keV energiájú vonala a  $\text{Rb}[\text{B}(\text{C}_6\text{H}_5)_4]$  preparátumban; illetve a csak  $\beta$ -bomló  $^{89}\text{Sr}$  izotópot tartalmazó  $\text{SrSO}_4$  mintát vizsgálva a háttérrel megegyező spektrumot mutathatunk be. A mérés ideje mind a négy esetben azonos volt. Megjegyzem, hogy mivel a  $^{86}\text{Rb}$  felezési ideje lényegesen meghaladja az  $^{88}\text{Y}$  felezési idejét, kellő várakozási idő után az (n, $\alpha$ ) reakció hatáskeresztmetszete elválasztás nélkül is mérhető.

**3.2. ábra.** A besugárzott Y-minta  $\gamma$ -spektrumai a radiokémiai elválasztás előtt és után



## A radioaktivitás mérése

A monitorfóliák és a reakciótermékek egy részének aktivitását roncsolásmentesen Ge(Li) illetve HPGe detektorokkal mértem,  $\gamma$ -spektrometriát alkalmazva. A leválasztott  $\text{SrSO}_4$ - és  $\text{Rb}[\text{B}(\text{C}_6\text{H}_5)_4]$ -minták esetében  $\beta$ -számlálásra került sor.

### a./ A $\gamma$ -spektrometria

A csúcsterület meghatározása IBM kompatibilis személyi számítógépekre írt MaestroII programmal történt. A detektorok hatásfoka különböző mérési távolságok esetére kalibrált, standard pontszerű gamma-forrásokkal lett meghatározva. Ebben a kísérletsorozatban csak a besugárzott  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -minták aktivitásának mérése ütközött nehézségekbe a korong kiterjedt mérete és kis aktivitása miatt. Ezért a detektor hatásfokának méréséhez egy speciális, homogén minta készült. Ismert aktivitású  $^{88}\text{Y}$ -izotópot kevertem az  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -porhoz, és a korongot ugyanúgy készítettem el, mint a besugárzandó mintákat. Az így elkészített standardot különféle geometriák esetén hatásfok meghatározásra használtam.

### b./ A $\beta$ -számlálás

Az elválasztott  $^{89}\text{Sr}$  ( $E_\beta = 1,49$  MeV) és  $^{86}\text{Rb}$  ( $E_\beta = 1,77$  MeV)  $\text{SrSO}_4$ - illetve  $\text{Rb}[\text{B}(\text{C}_6\text{H}_5)_4]$  formájában került  $\beta$ -számlálásra. Erre a célra egy kis aktivitások mérésére is alkalmas antikoincidenca  $\beta$ -számlálót használtam

Ez a detektorrendszer igen stabil (BERTHOLD, LB 2711 és Multi-Logger LB 5310) és a háttér minden esetben kb. 2 cpm. A hatásfokot különféle maximális  $\beta$ -energiájú standard forrásokkal határoztam meg. A felezési idők ellenőrzése végett a méréseket több felezési időn keresztül kellett végezni. A kapott aktivitásokat korrigálni kellett a mintában történt önabszorpcióra és a gravimetriai hozamra.

### Interferenciák

Az interferenciákat figyelembe véve két típusú korrekciót kellett alkalmazni.

### a./ $\beta$ - és $\gamma$ -háttér

A természetes háttérsugárzáson kívül az elválasztott mintákból származó  $\beta$ -háttérrel is figyelembe kellett venni, ezért 8 hónapon keresztül ismételt aktivitásmérések követték egymást. Mindegyik mintában jelen volt egy igen hosszú felezési idejű komponens. Ennek aktivitását levonva a stronciumot tartalmazó minta bomlásgörbéjére az 50,6 d felezési idő illeszthető, míg a rubídium minta esetén a 18,7 d. Ez a háttér ismeretlen eredetű, az aktivitáshoz való hozzájárulása  $\leq 3$  %, minden alkalommal levonásra került.

A  $\gamma$ -spektrometria során is ellenőrizni kellett a háttérrel. A Compton-háttér mellett a  $^{86}\text{Rb}$  és az  $^{88}\text{Y}$   $\gamma$ -vonalai környékén jelentkező háttérsúcsok lehetnek zavaróak. Mivel  $\gamma$ -sugárzásra jól árnyékolt detektort használtam [3.23], a háttérszint kevesebb volt, mint 0,3 %.

### b./ A háttérneutronok hatása

Egyrészt meg kell említeni, hogy 7 MeV deuteronenergia fölött a háttérneutronok hatására is keletkeznek a vizsgálat tárgyát képező reakciótermékek. Ezt a már említett „gas in/gas out” korrekcióval vettem figyelembe. A szórt neutronok hatását el kellett hanyagolni ezekben a kísérletekben. Egy másik hatás, nevezetesen a deuteron-felhasadással végbemenő  $^2\text{D}(d,pn)^2\text{D}$  reakcióból származó ún. „breakup” neutronok hatását megbecsülhetjük. Erre a célra nagyon jól alkalmazhatók Cabral és munkatársainak ide vonatkozó eredményei [3.24] A szerzők megadják a monoenergiás és a „breakup” neutronoktól eredő aktivitások hányadosát a neutronenergia és a reakcióküszöb függvényében. Ezen eredmények interpolációit felhasználva a „breakup” neutronok miatti korrekció a kis küszöbenergiájú reakciókra nézve néhány százalékos.

### A hatáskeresztmetszetek kiszámítása és a hiba becslése

A  $\beta$ -és a  $\gamma$ -aktivitásokat a fentiekén kívül további korrekcióknak kellett alávetni, figyelembe véve a reakciótermékek bomlási tulajdonságait és a detektor hatásfokát. A hatáskeresztmetszeteket a jól ismert aktivációs formulával számítottam ki. A hibák legfőbb forrásait és nagyságukat a 3.III. táblázatban ismertetem.

A hatáskeresztmetszetek teljes hibái az egyes hibák négyzetösszegének gyökei. Ebben a kísérletsorozatban a teljes hibák 8-29 % közé estek. Az (n, $\alpha$ ) és (n,p) reakció-hatáskeresztmetszetek hibái a legnagyobbak (25-29%) a radiokémiai elválasztás és a  $\beta$ -számlálás miatt. A  $\gamma$ -spektrometria

esetén a hiba fő forrásai a statisztikus hiba és a különféle háttérneutronoktól származó hiba.

**3.III.táblázat.** A hiba legfontosabb forrásai és értékei

A hiba forrásai	A hiba nagysága (%)			
	$\gamma$ -spektroszkópia		$\beta$ -számlálás	
	$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	$^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$	$^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$	$^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$
neutron energia	2-3*	2-3*	2-3*	2-3*
besugárzási idő	0,1	0,1	0,1	0,1
a besugárzás geometriája és anyaláb eltérése	3	3	3	3
kémiai hozam			5	5
a minta tömege	<1	<1	<1	<1
statisztikus hiba	1-3	3-10	1	1
csúcsterület-meghatározás hibája	3	3		
a detektor hatásfoka (standard források, geometria)	5	5	8-10	8-10
a bomlászörbe analízise			10-16	10-14
a háttérneutronok okozta aktivitás korrekciója(gas in/gas out, breakup)	1-3	5-20	5-20	5-20
a bomlás adatai	1	1	1	1
a monitorreakciók gerjesztési függvényei	3-8	3-8	3-8	3-8
a teljes hiba	8-11	9-25	15-29	15-28

\*A D-T neutronforrás esetén ez az érték  $\leq 1\%$



## Az eredmények összefoglalása

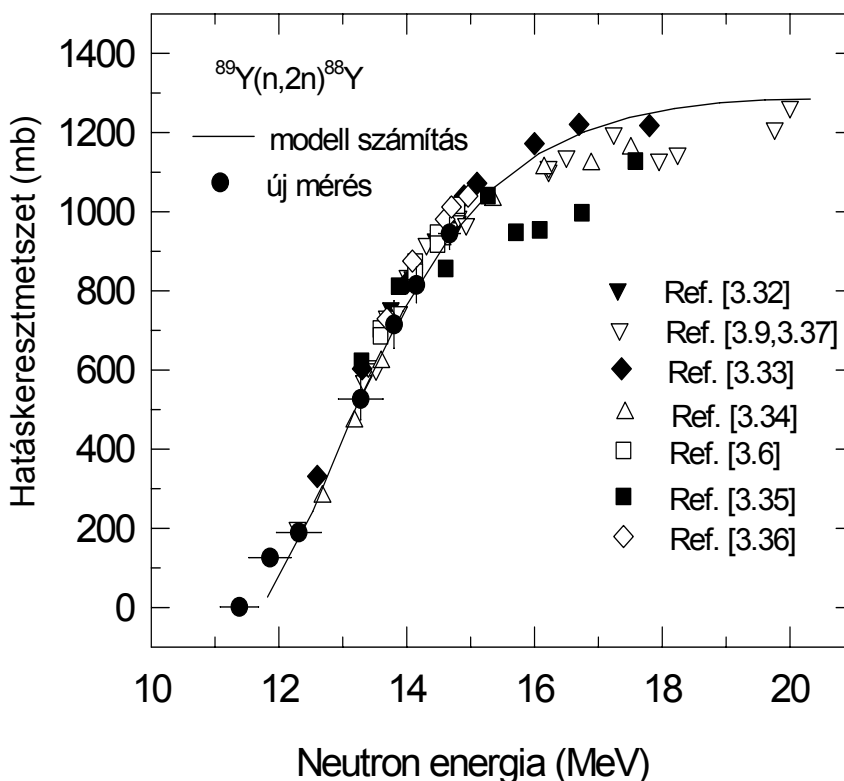
### 1. A gerjesztési függvények

A publikált gerjesztési függvényekhez tartozó hatáskeresztmetszet-  
adatok és hibáik a 3.IV. táblázatban találhatóak. Külön tüntettem fel a  
kétféle aktivitásméréssel ( $\beta$  illetve  $\gamma$ ) kapott értékeket.

**3.IV. táblázat.** A vizsgált Y-reakciók mérési eredményei

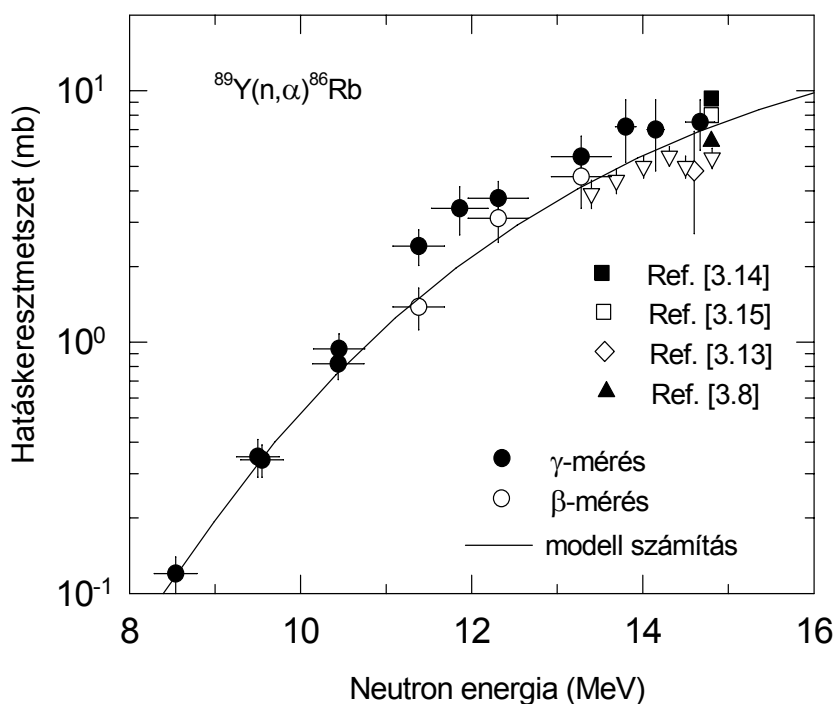
E <sub>n</sub> (MeV)	Hatáskeresztmetszet (mb)			
	$\gamma$ -spektroszkópia		$\beta$ -számlálás	
	$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$	$^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$	$^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$	$^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$
7,81 ± 0,20				4,1 ± 1,1
8,54 ± 0,25		0,12 ± 0,02		5,3 ± 0,8
9,50 ± 0,25		0,35 ± 0,06		
9,55 ± 0,25		0,34 ± 0,05		8,2 ± 1,4
10,44 ± 0,30		0,82 ± 0,11		
10,45 ± 0,30		0,94 ± 0,14		10,1 ± 2,0
11,38 ± 0,30	1,2 ± 0,1	2,41 ± 0,39	1,38 ± 0,28	14,1 ± 2,8
11,86 ± 0,33	125,8 ± 10,8	3,41 ± 0,74		14,5 ± 3,8
12,31 ± 0,35	189,4 ± 18,9	3,74 ± 0,62	3,11 ± 0,62	13,8 ± 3,0
13,28 ± 0,35	526,6 ± 52,7	5,47 ± 1,13	4,55 ± 1,14	18,4 ± 4,6
13,82 ± 0,10	765,7 ± 65,9	6,11 ± 0,60		15,8 ± 4,2
14,10 ± 0,10	799,3 ± 68,8	6,22 ± 0,61		14,9 ± 3,9
14,67 ± 0,14	964,5 ± 82,9	5,02 ± 0,49		16,0 ± 4,2

Az  $^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$  reakció hatáskeresztmetszetének mérése kizárólag  $\gamma$ -spektrometriai módszerrel történt. A 3.3. ábrán láthatóak az eredményeink néhány irodalmi adattal együtt, amelyeket szintén aktivációs technikával határoztak meg. Csak azon szerzők értékeit tüntettem fel, akiknek a mérései elég széles energiatartományt fognak át [3.6; 3.9; 3.32-3.37]. További, 14,5 MeV neutronenergiára vonatkozó adatok találhatóak a [3.6] irodalomban. Az értékek jó egyezést mutatnak, kivéve az Abboud és munkatársai által mérteket [3.35], amelyek alacsonyabbak. Az általunk mért gerjesztési függvényünk 12 MeV neutronenergia alatt új információkat hordoz. A 3.3. ábrán feltüntetett aktivációs adatok jól egyeznek a neutronok detektálása révén kapott értékekkel [3.38; 3.39].



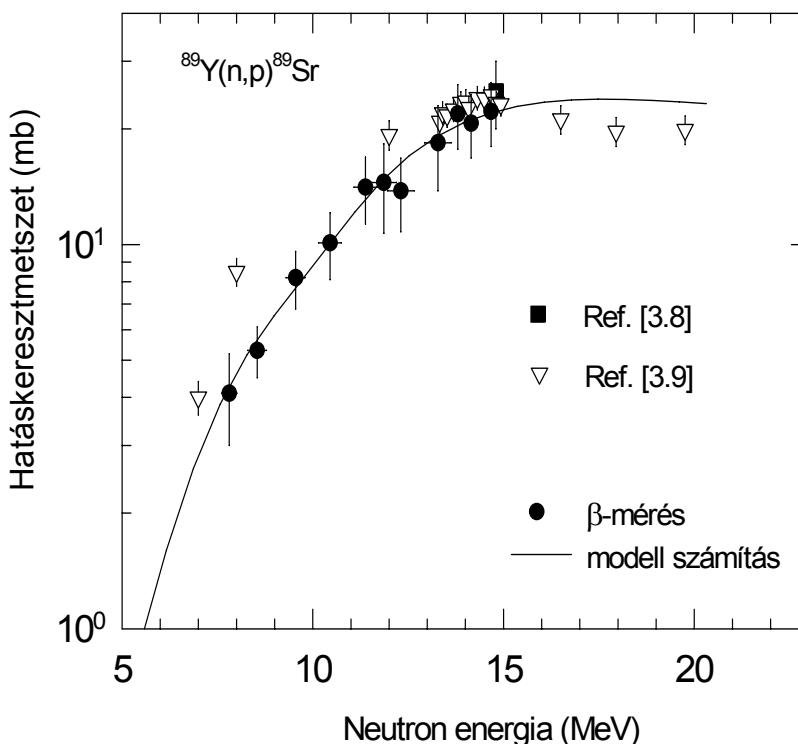
3.3.ábra. Az  $^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$  reakció gerjesztési függvénye

Az  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$  reakció hatáskeresztmetszetének meghatározása a legtöbb esetben  $\gamma$ -spektrometriai módszerrel, néhány minta esetében  $\beta$ -számlálással is történt. Az összes mérési pont megtalálható a 3.4. ábrán. A két módszer jól egyező eredményeket ad. Az ábrán látható még néhány irodalmi adat [3.8; 3.9; 3.13-3.15]. A [3.11] és [3.12] irodalom 14 MeV neutronenergia környékén mért értékeit nem tüntettem fel, amelyek jelentősen eltérnek a trendtől, valamint a publikálásra még nem került [3.10] irodalom adatait. Különös figyelmet érdemelnek a 14,8 MeV neutronenergián mért hatáskeresztmetszetek, amelyeket tömegspektrometriai módszerrel [3.14] és alfa-számlálással [3.15] is meghatároztak. A különféle technikákkal kapott eredmények jól egyeznek. A 13 MeV neutronenergia alatti tartományban méréseink szolgáltatják az első összefüggő adatsort.



3.4. ábra. Az  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$  reakció gerjesztési függvénye

Az  $^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$  reakció hatáskeresztmetszetének mérése kizárólag radiokémiai elválasztással és béta-számlálással történt. Az eredmények a 3.5. ábrán láthatók. Ebben az esetben nem tüntettem fel az igen régi, illetve még publikálatlan adatokat [3.7; 3.10]. Az  $(n,\alpha)$  reakcióval ellentétben itt nem hasonlíthatjuk össze az aktivációs eredményeket a protonok detektálásán alapulókkal [3.15], hiszen 14-15 MeV neutronenergia környékén az  $(n,n'p)$  és az  $(n,pn)$  folyamatok jelentősen hozzájárulnak a protonemisszióhoz. Egyedül Bayhurst és munkatársai alkalmaztak szintén radiokémiai módszereket [3.9]. Az általunk nyert értékek valamivel alacsonyabbak, de összefüggőbb gerjesztési függvényt adnak meg a reakcióküszöb illetve 12 MeV neutronenergia környékén.



3.5. ábra. Az  $^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$  reakció gerjesztési függvénye

## 2. A kísérleti eredmények összevetése az elméleti számításokkal

A vizsgált gerjesztési függvények elméleti leírására Dr. Sudár Sándor végzett nukleáris modellszámításokat a STAPRE [3.25] számítógépes kód segítségével. Az általa alkalmazott módszerek részletes ismertetése különféle elméleti munkákban megtalálhatók [3.26-3.31]. A számításokat a következő megfontolások alapján végezte: A preequilibrium emissziót az exciton modell segítségével számította, valamint a szélesség fluktuációra korrigált Hauser-Feshbach formulát használta az egyensúlyi reakcióra. A részecskék transzmissziós koefficienseit az optikai modellel számította. A neutron csatorna optikai modell paramétereit úgy módosította, hogy visszakapjuk a kísérleti totális neutron hatáskeresztmetszetet. A diszkrét nívók adatait az ENSDF adatkönyvtárból vette. Magasabb energián a nívók leírására a Fermi gázmodell módosított változatát használta. A modellszámítás eredményét is feltüntettem a 3.3-3.5. ábrákon. Az  $^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$  reakciót kiválóan írja le ez a precompound hatásokat is magában foglaló statisztikus modell. Az  $(n, \text{töltött részecske})$  reakciók esetén az egyezés kisebb mértékű, de jónak mondható.

## 3. A gerjesztési függvények szisztematikus trendje

A jülich-i intézetből nemrégiben látott napvilágot néhány közlemény, amely molibdén [3.40; 3.41], nióbbium [3.42], és cirkónium [3.43; 3.44] izotópokon neutronok által kiváltott magreakciók gerjesztési függvényeivel foglalkozik. A 3. fejezetben vázolt kísérletsorozat kiegészítője ezen tömegszám-tartomány vizsgálatának. A targetmag szerkezete, amelynek hatása a különféle reakciók  $Q$  értékeiben is tükröződik, jelentősen befolyásolja a gerjesztési függvények menetét. Az  $(n,p)$  és  $(n,\alpha)$  reakciók esetében például a targetmag növekvő aszimmetria-paraméterével  $(N-Z)/A$  a reakcióküszöb nő, a gerjesztési függvények maximuma a magasabb energiák felé tolódik el, és a hatáskeresztmetszetek maximumértékei alacsonyabbak. Az  $(n,2n)$  reakció esetén a trend ezzel éppen ellentétes. A hatáskeresztmetszet-adatbázisok részletesebb feldolgozása lehetővé teszi ezen trendek jobb megértését.

## Rövid felezési idejű végtermékekhez vezető magreakciók hatáskeresztmetszetének mérése

### Bevezetés

Ebben a fejezetben az  $^{89}\text{Y}$  izotóp rövid felezési idejű, izomer állapotban keletkező termékekhez vezető reakcióival foglalkozok: az  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}}\text{Rb}$  és az  $^{89}\text{Y}(n,n'\gamma)^{89\text{m}}\text{Y}$  reakciókkal.

A totális neutron- illetve töltött részecske emissziós hatáskeresztmetszetek általában jól számíthatók a statisztikus modell segítségével a kb. 30 MeV bombázó részecskeenergiáig terjedő tartományban [3.45-3.47] figyelembe véve a compound és precompound járulékokat. Azonban az izomer állapot keletkezésével járó reakciók elméleti leírása még nem megoldott [3.48], pl. a Hauser-Feshbach modellben az izolált nívók járulékeinak figyelembevétele, valamint a nívósűrűség-formula megválasztása okoz bizonytalanságot. Ezért is különösen fontos az ilyen folyamatok pontos kísérleti vizsgálata.

A gyakorlatban az izomer állapotok keletkezésével járó (n, töltött részecske) reakciók esetén a kis hatáskeresztmetszet okoz gondot. A vizsgált  $(n,n'\gamma)$  reakció hatáskeresztmetszete viszonylag nagy, de mivel a reakcióküszöb alacsony, itt a háttérneutronok jelenléte okoz problémát; a szakirodalomban [3.2] megtalálható adatok ezért általában két neutronenergia-tartományra korlátozódnak (5 MeV alattira illetve 14 MeV környékére), ahol is a rendelkezésre álló neutronforrásokkal alacsony háttér biztosítható. A kísérleti adatok és az elméleti számítások összehasonlítására sok olyan példát láthatunk az irodalomban [3.45, 3.47, 3.49, 3.50], amelyek széles energiatartományt fognak át. Az  $(n,n'\gamma)$  folyamat esetén a kísérleti adatok hiánya miatt csak a gerjesztési függvény két végénél (növekvő és csökkenő ág) lehetséges az összevetés. Az  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}}\text{Rb}$  reakció gerjesztési függvényére ez ideig csak 14 MeV neutronenergia környékén található kísérleti adatok.

### Kísérleti megvalósítás

A besugárzásokat és a hatáskeresztmetszetek meghatározását nyolc különböző neutronenergiánál végeztem, később Dr. Sudár Sándor öt további ponttal egészítette ki a gerjesztési függvényt. A minták előkészítése és besugárzása a 3.A/ pontban leírtak szerint történt: Jülichben a CV28-as kompakt ciklotront használtam a 6-13 MeV energiájú neutronok előállítására, míg a 14 MeV energia környékén a debreceni DT generátor szolgált neutronforrással. Az aktivitásokat gamma-spektrometriai módszerrel határoztam meg (a bomlási adatokat a 3.V. táblázatban foglaltam össze). Itt csak a különbségeket emelem ki. Besugárzáskor az  $(n,\alpha)$  reakció kis hatáskeresztmetszete miatt a „beam stop”-minta távolságot 0,5 cm-re csökkentettem. Fluxusmonitorként szilícium mintákat használtam, így a monitorreakció végtermékének felezési ideje közelebb került a mérendőéhez. A  $^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$  reakció hatáskeresztmetszetét minden egyes energiánál közvetlenül az Y-minta besugárzása előtt meghatároztam a ciklotron paramétereinek azonos beállítása mellett, referenciaként [3.51] az  $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$  reakciót véve ( $T_{1/2}=9,46\text{min}$ ,  $E_\gamma = 843,7\text{ keV}$ ,  $I_\gamma = 73,0\%$ ). Sajnos a monitorreakció gerjesztési függvényére vonatkozó kiértéklések jelentős eltérést mutatnak, ami a mért adatok pontosságát számottevően befolyásolhatja. Célszerűnek látszik megvizsgálni az egyes adatkönyvtárak közötti eltérések hatását a mért adatokra. A neutrongenerátorral végzett besugárzások esetében, 14 MeV energia környékén, megbízható adatok [3.52] állnak rendelkezésre, itt a  $^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$  reakció hatáskeresztmetszetét nem kellett vizsgálni.

A ciklotronra alapozott méréseknél az előző pontban már ismertetett „gas out” és „break-up” neutronkorrekciók mindegyikét el kellett végezni. Ez utóbbi korrekció a mérés hibájához nagy mértékben hozzájárul az  $^{89}\text{Y}(n,n'\gamma)^{89m}\text{Y}$  reakció esetén, kiváltképp nagyobb neutronenergiáknál.

### **3.V. táblázat.** A vizsgált reakciók bomlási adatai

Reakció	$T_{1/2}$	$E_\gamma$ (keV)	$I_\gamma$ (%)
$^{89}\text{Y}(n,n'\gamma)^{89m}\text{Y}$	16,09 s	909,1	99,1
$^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86m}\text{Rb}$	1,02 min	556,1	98,19

### Az eredmények összefoglalása

A hatáskeresztmetszeteket a 2. Fejezetben ismertetett aktivációs formulával számítottam ki. A vizsgálatsorozat eredményeként kirajzolódó gerjesztési függvények a 3.6. és a 3.7. ábrákon láthatók. A mért értékeket és azok totális hibáit a 3. VI. táblázatban adom meg.

A 3.6. ábrán az  $^{89}\text{Y}(n,n'\gamma)^{89m}\text{Y}$  reakcióra vonatkozó adatok szerepelnek. Feltüntettem a 4 MeV alatti [3.35] és a 13 MeV feletti [3.35, 3.53, 3.54, 3.68] neutronenergia-tartományra vonatkozó irodalmi értékeket is. Az általam mért, új adatsor legfontosabb eredménye, hogy ezt a gerjesztési függvényben lévő szakadékot íveli át. Az ábrán feltüntettem a STAPRE kód segítségével számított görbét is, amely a teljes energi tartományon belül jól követi a mérési adatokat.

A 3.7. ábrán az  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86m}\text{Rb}$  reakció elsőként kimért gerjesztési görbéje látható. A számítás itt is jól egyezik a mért értékekkel. Az előző pontban vizsgált  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86m+g}\text{Rb}$  folyamatra vonatkozó hatáskeresztmetszet-értékeket felhasználva képeztem a  $\sigma_m/(\sigma_m+\sigma_g)$  hányadost, vagyis az ún. izomer hatáskeresztmetszet arányt. Ez megmutatja, hogy különböző bombázó neutron energiák esetén milyen arányban keletkezik a metastabil állapotú végtermék. A kísérleti eredménynek és az elmélettel való összehasonlítása, amint ez a 3.8. ábrán látható, jó egyezést mutat.

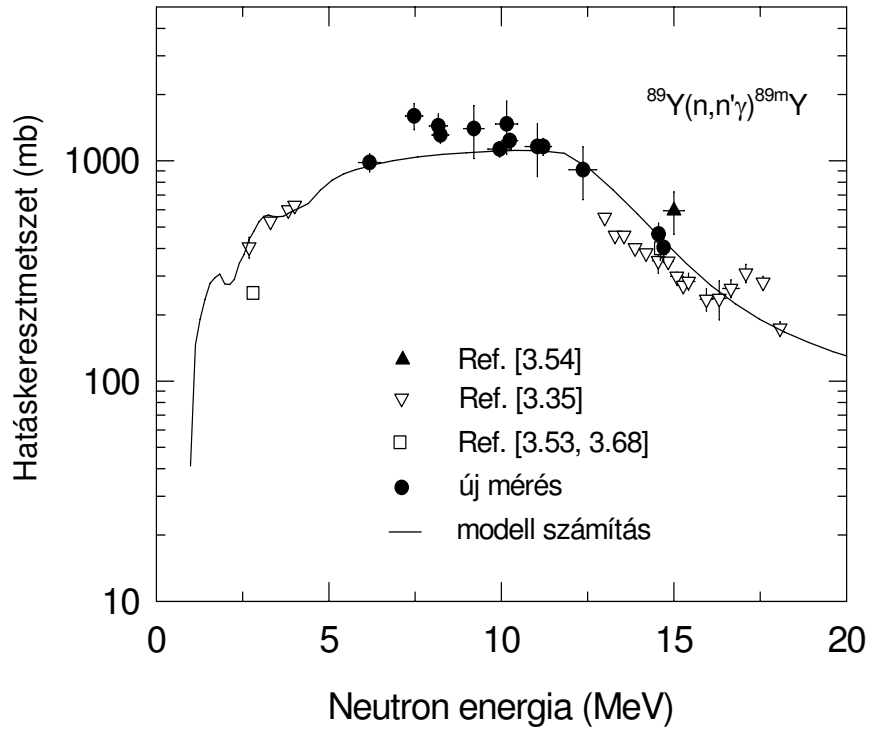
### 3.VI. táblázat. A vizsgált reakciók hatáskeresztmetszetei és azok hibái

$E_n$ (MeV)	$^{89}\text{Y}(n,n'\gamma)^{89m}\text{Y}$ $\sigma$ (mb)	$^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86m}\text{Rb}$ $\sigma$ (mb)
6,18±0,32	983±92	
7,47±0,25	1601±216	
8,17±0,26	1440±193	
8,23±0,24	1311±113	
9,20±0,29	1402±378	0,10±0,03
9,95±0,34	1130±87	0,14±0,03
10,15±0,32	1470±401	0,21±0,04
10,24±0,23	1236±94	0,16±0,03
11,04±0,35	1161±314	
11,21±0,24	1162±103	0,35±0,03
12,36±0,40	912±246	1,01±0,14
14,55±0,20	465±56	2,02±0,21
14,70±0,10	404±59	2,18±0,27

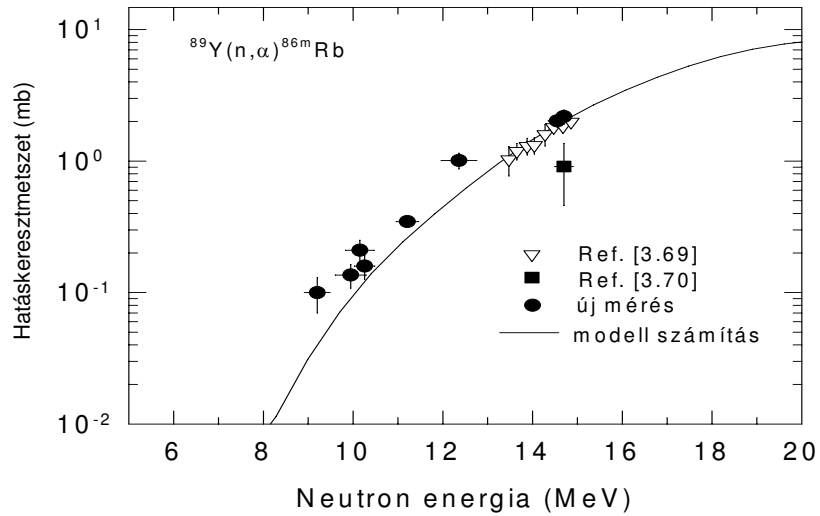


Itt jegyzem meg, hogy az izomer viszony meghatározására a  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58\text{m}+g}\text{Co}$  reakció esetén is sor került. Erre két lehetőség kínálkozik. Az egyik az előbb ismertetett metódus, azzal a különbséggel, hogy a  $^{58\text{m}}\text{Co}$  reakciótermék esetében röntgenspektrumot kell analizálni. A másik azon alapul, hogy 100 %-os izomer átmenet következik be, így a 810 keV-os gamma-vonal csúcsterületét a hűtési idő függvényében kimérjük, és a kapott telítési görbéből a viszony számítható. Ehhez a munkához főleg a telítési görbe éjszakánkénti kimérésével járultam hozzá. A kiértékelések egy részében szintén részt vettem. Ez a téma más disszertáció témáját képezi, ezért itt csak a közös publikációra utalok: V. Avriganu, S. Sudár, Cs. M. Buczkó, J. Csikai, A. A. Filatenkov, S. V. Chuvaev, R. Dóczi, V. Semkova and V. A. Zelenetsky, Energy Dependence of the Isomeric Cross Section Ratio in the  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}^{\text{m},g}$  Reactions.

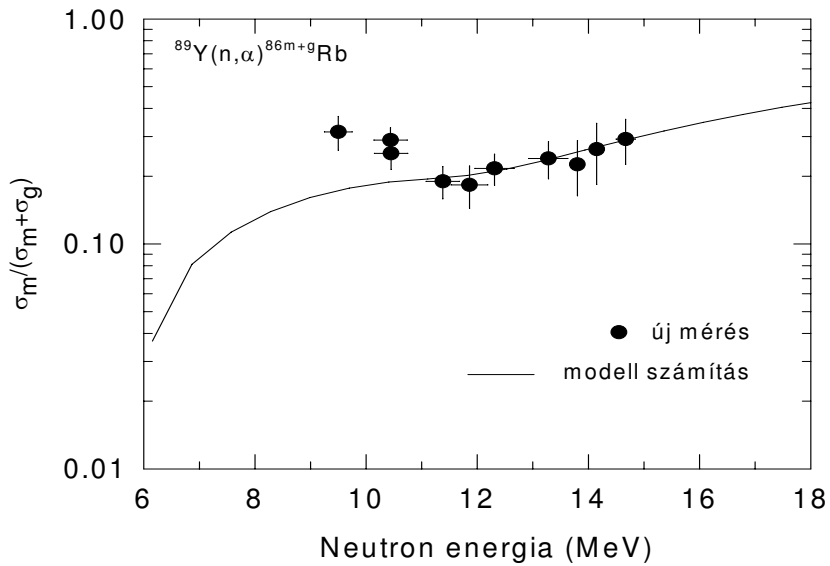
3.6. ábra. Az  $^{89}\text{Y}(n,n'\gamma)^{89\text{m}}\text{Y}$  reakció gerjesztési függvénye



3.7. ábra. Az  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}}\text{Rb}$  reakció gerjesztési függvénye



3.8. ábra. Az  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}+\text{g}}\text{Rb}$  reakció izomer viszonyának energiafüggése



## A gerjesztési függvények ellenőrzése integrális adatokkal

### Bevezetés

A különféle neutronterek jellemzése önmagában is izgalmas feladat, ám nagy gyakorlati jelentőségét például az is jelzi, hogy a legteljesebb és legmegbízhatóbb hatáskeresztmetszet adatsorok a 14 MeV körüli neutronenergia-tartományban vannak, ugyanis a rendelkezésre álló D-T források neutronspektrumai pontosan ismertek kis (100-400 keV) energiájú bombázó részecskék esetén [3.19].

A ciklotronnal végzett kísérleteimben felhasznált  ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$  reakció szintén kvázimonoenergiás neutronforrásként szolgált. Az eddigiekben bemutattam, hogy a nemkívánatos energiájú neutronok hatását korrekcióba kell venni. A „break up” neutronkorrekció irodalmi adatok alapján történt, azonban a most következő „unfolding” módszerrel magam is határoztam meg neutronspektrumokat a 4. fejezet kísérleteivel kapcsolatban.

A Be(d,n) forrás tere igen összetett. Először bemutatom az „unfolding” módszerrel kapott spektrumot, amelyet integrális hatáskeresztmetszetek meghatározására használtam fel.

### A Be(d,n) forrás tere

A méréseknél vastag berillium targetet használtam. A vastag céltárgyra alapozott Be(d,n) forrás spektrumáról és neutronhozamáról a következő irodalmak adnak számot: Weaver [3.55], Lone [3.56, 3.57], Dietze [3.58], Crametz [3.59], Tancu [3.60], Smith [3.61], Baumann [3.62], Brede [3.63] valamint Grimes és munkatársai [3.64], amelyek közül az utóbbi a legfrissebb.

A neutron-spektrumok meghatározására az „unfolding” módszerrel kombinált sokfóliás aktivációs technikát alkalmaztam. A felhasznált SULSA nevű programot Dr. Sudár Sándor dolgozta ki, ami a már évtizedek óta alkalmazott „unfolding” kód továbbfejlesztett változata [3.65].

A módszer újszerűsége abban rejlik, hogy bemenő spektrum nélkül oldhatjuk meg a problémát; ugyanis ez minden numerikus számítás legkritikusabb része:

$n$  db reakciósebességet ( $a$ ) kell mérnünk, még hozzá különböző küszöbenergiájú és jól ismert gerjesztési függvényű neutron reakciókra.

A megoldásra váró kifejezés:

$$a_i = \int \Phi(E) \sigma_i(E) dE \quad (i=1,..n), \quad \text{ahol}$$

$a_i$  : az  $i$ -edik neutron reakció reakciósebessége

$\sigma_i$  : az  $i$ -edik neutron reakció gerjesztési függvénye

$\Phi(E)$  : az ismeretlen differenciális neutronfluxus.

Hogyha  $n$  db reakciósebességet mértünk, csak  $m < n$  számú független paraméter határozható meg, ezért a következő szukszesszív aproximációt alkalmazzuk:

A vizsgált energiatartományt  $m_0 < n$  részre osztjuk — átlgfluxust értelmezünk egy-egy tartományon belül — , és az unfolding problémát közelítően oldjuk meg. Ezután lineáris interpolációval finomítjuk a megoldást, majd ezt az új közelítést használva oldjuk meg újra és újra a feladatot, míg a kívánt finomságot el nem érjük. Matematikailag ehhez a legkisebb négyzetek elvének egy módosított változata szükséges. Ezzel az újonnan kidolgozott eljárással a hibaterjedés is jól kezelhető.

A vázolt módszerrel kapott energiafeloldást a spektrumra a hatáskeresztmetszetek száma és a gerjesztési függvény alakja határozza meg. Így az eredmény hasonló egy kis energiafeloldású neutron spektrométerrel mért spektrumhoz.

A program FOTRAN nyelven íródott IBM PC/XT kompatibilis számítógépekre. A szükséges hatáskeresztmetszeteket az IRDF90 [3.20] computer file-ból vettem. A felhasználó a mért reakciósebességeket, azok hibáit adja meg százalékban, valamint azon az energiacsoportokat, amelyeknél az iteráció történik. Eredményül megkapjuk a differenciális és a teljes fluxust az egyes energiaintervallumokban, valamint azok hibáját.

A 3.VII. táblázatban foglaltam össze azokat a reakciókat, amelyeket a spektrum visszaállítására felhasználtam.

Az ilyen módon meghatározott spektrumot összehasonlítottam a neutron spektrométerrel [3.66, 3.67] (Pulse Height Response Spectrometer, PHRS) mérttel. A PHRS spektrumot Oláh László készítette a ciklotron paramétereinek azonos beállítása mellett. A spektrumok a 3.9.

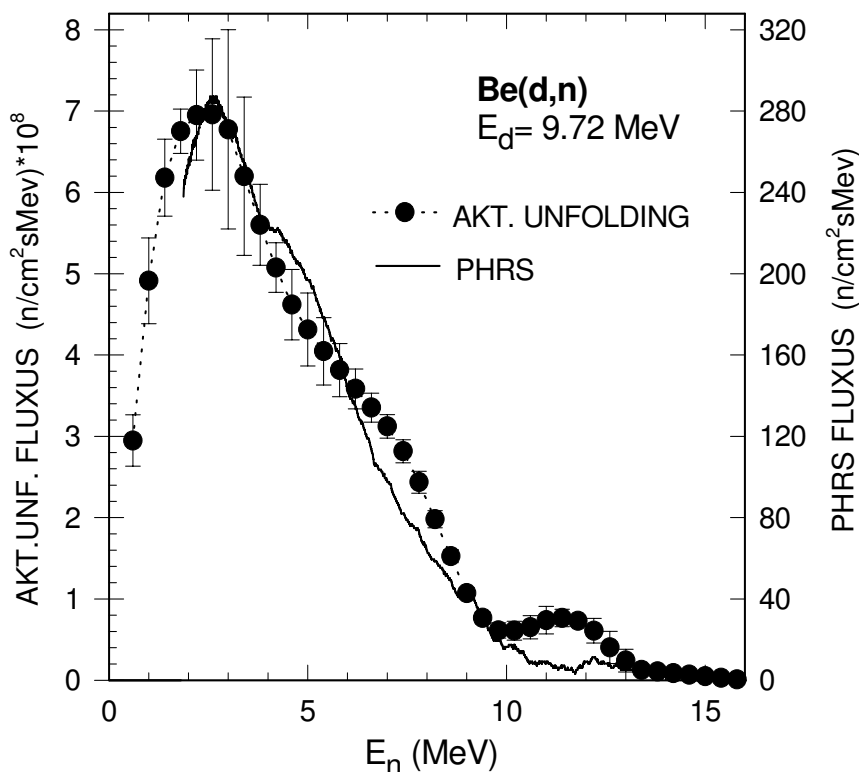
ábrán láthatók. A besugárzott fóliacsomag a forrástól 2,5 cm, míg a spektrométer 75 cm távolságra volt. Így az előbbi esetben a térszög nagyobb, ennek és a PHRS energiaküszöbének tulajdonítható, hogy az aktivációs módszerrel kapott spektrumhoz a kis energiájú neutronok nagyobb járulékot adnak. A nagy energiáknál mutatkozó eltérés az aktivációs reakciók korlátozott számával és a PHRS spektrum rossz statisztikájával magyarázható.

Az ábrán látható spektrumot a 4. fejezetben használok fel. A kísérleti körülmények részletes leírása is ott szerepel. Ez az összehasonlító vizsgálat, amely itt illusztrációként szolgál, Debrecenben történt. A következőkben az itrium minták Be(d,n) forrással történt besugárzását ismertetem.

### 3.VII. táblázat. A spektrum „unfoldinghoz” felhasznált reakciók és nukleáris adatok

Reakció	Küszöbenergia (MeV)	T <sub>1/2</sub>	E <sub>γ</sub> (keV)	I <sub>γ</sub> (%)
<sup>56</sup> Fe(n,p) <sup>56</sup> Mn	2.98	2.5785 h	846.812	98.9
<sup>115</sup> In(n,g) <sup>116m2+m1</sup> In	0.00	54.15 min	416.92	29.2
			1097.29	56.2
			1293.59	84.4
<sup>115</sup> In(n,n') <sup>115m</sup> In	0.34	4.486 h	336.258	45.8
<sup>27</sup> Al(n,a) <sup>24</sup> Na	3.20	14.659 h	1368.598	100
<sup>58</sup> Ni(n,2n) <sup>57</sup> Ni	4.24	1.503 d	1377.62	77.9
<sup>48</sup> Ti(n,p) <sup>48</sup> Sc	3.28	1.821 d	983.501	100.0
			1037.4961	97.5
			1312.046	100.0
<sup>90</sup> Zr(n,2n) <sup>89g</sup> Zr	1.62	3.268 d	909.15	99.01
<sup>47</sup> Ti(n,p) <sup>47</sup> Sc	0.00	3.341 d	159.381	68
<sup>197</sup> Au(n,2n) <sup>196g</sup> Au	0.00	6.183 d	355.58	87
<sup>93</sup> Nb(n,2n) <sup>92m</sup> Nb	0.91	10.15 d	934.53	99.0
<sup>58</sup> Ni(n,p) <sup>58m+g</sup> Co	0.00	70.916 d	810.791	99.5
<sup>46</sup> Ti(n,p) <sup>46g</sup> Sc	1.62	83.83 d	889.25	99.984
			1120.51	99.987

**3.9. ábra.** Az aktivációs és a PHRS módszerrel nyert neutronspektrumok összehasonlítása



Az  $^{89}\text{Y}$  izotópon végbemenő neutron reakciók spektrumra átlagolt hatáskeresztmetszetei

A besugárzásokra Jülichben a CV 28-as kompakt ciklotront használva került sor. A deuteron energia 14,11 MeV volt. Targetként korong alakú fém berillium szolgált (átmérője 19,7 mm, vastagsága 1,9 mm, tisztasága 98 m/m%), amely egy vízzel hűtött, rézből készült tokban helyezkedett el. A mintacsomagot, amely az eddigiekkel azonos módon előkészített ittrium-oxid mintát és az unfolding reakciók méréséhez szükséges vékony fémfóliákat tartalmazta, a targettól 0,4 cm távolságra tettem. Mivel a mintacsomag igen sok egymás mögé helyezett részből állt, három alumíniumfólia került a csomagba, hogy a neutronfluxus gyengülését

polinom illesztéssel meghatározhassam. A 2 cm átmérőjű fémfóliák aktivitását  $\gamma$ -spektrometriai módszerrel mértem meg, majd kiszámítottam a szükséges reakciósebességeket az aktivációs egyenlet segítségével. Az „unfolding” végrehajtása után a 3.10. ábrán látható neutronspektrumot kaptam.

A besugárzott  $Y_2O_3$  mintát a  $\gamma$ -spektrometriai elemzés után alávettem a már ismertett radiokémiai elválasztásnak és  $\beta$ -számlálásnak, így kísérletileg meghatároztam az  $^{89}Y(n,2n)^{89m}Y$ ,  $^{89}Y(n,p)^{89}Sr$ ,  $^{89}Y(n,\alpha)^{86}Rb$  és  $^{89}Y(n,\alpha)^{86m}Rb$  reakciók spektrumra átlagolt hatás keresztmetszetét. Az  $^{89}Y(n,n'\gamma)^{89m}Y$  reakció mérésével is próbálkoztam, ám mivel itt az igen rövid felezési idő miatt a minta és az „unfolding” fóliák besugárzása csak külön történhet, célszerűnek látszik a továbbiakban folytatni a kísérletsorozatot és ismert aktivitású neutronforrást (pl. PuBe forrást) használni, amelynél a fluxus sűrűség spektrum pontosan megadható.

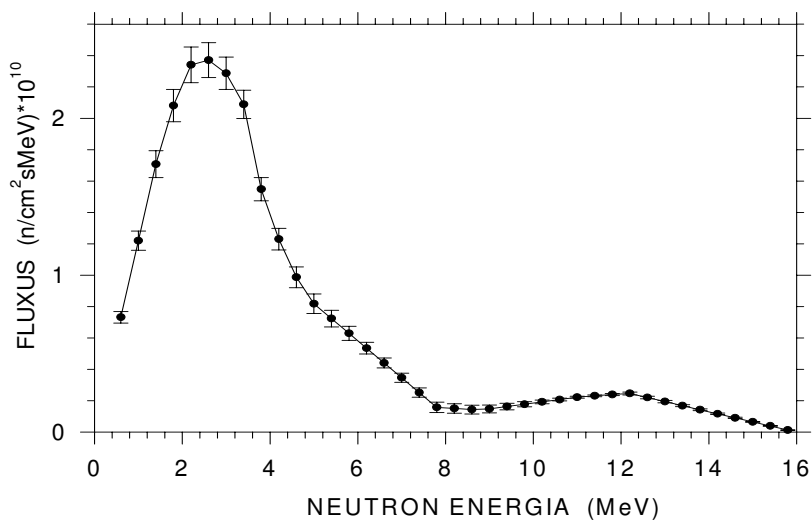
Az átlagos hatás keresztmetszetet a következőképpen írhatjuk fel:

$$\langle \sigma \rangle = \int_0^{E_{\max}} \sigma(E) \phi(E) dE / \int_0^{E_{\max}} \phi(E) dE, \quad \text{ahol} \quad \int_0^{E_{\max}} \phi(E) dE = 1. \quad /3.1/$$

Ezen összefüggést felhasználva számításokat is végeztem a különféle adatbankok által ajánlott gerjesztési függvényeket illetve a STAPRE számítás eredményeit alapul véve. Az ilyen módon meghatározott adatokat összehasonlítottam a mért eredményekkel. Ezt a VIII. táblázatban mutatom be. A méréssel legjobban egyező adatokat vastag betűvel emeltem ki. A számított értékekben mutatkozó eltérések azzal magyarázhatók, hogy a reakcióküszöb közelébe eső energiáknál a neutronfluxus nagy, így az ottani  $(\phi\sigma)$  járuléka meghatározó. Ez az oka annak is, hogy a mért differenciális értékeket nem célszerű közvetlenül összehasonlítani a mért integrális értékekkel, hiszen ezeknél az energiáknál az illesztés pontatlan lehet. Az  $^{89}Y(n,\alpha)^{86}Rb$  reakcióra kapott értékek közötti jelentős eltérés tisztázása további vizsgálatokat igényel. Az integrális tesztek nagy segítséget nyújtanak abban, hogy az olykor igen ellentmondásos adatsorok közül a legmegfelelőbbet tudjuk később gyakorlati célokra felhasználni, illetve ajánlani.



**3.10. ábra.** Aktivációs módszerrel kapott neutronspektrum  
 $E_d=14,11$  MeV esetén



**3.VIII. táblázat.** A vizsgált reakciók folytonos spektrumra átlagolt hatáskeresztmetszetei

Reakció	Mért < $\sigma$ > (mb)	Számított < $\sigma$ > (mb)
$^{89}\text{Y}(n,2n)^{88\text{m}}\text{Y}$	$33,71 \pm 3,24$	<b>29,10 JENDL 3.2</b> 28,66 JEF 2 26,18 STAPRE
$^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$	$1,53 \pm 0,22$	<b>1,94 STAPRE</b> 2,14 ADL-3 2,34 JEF 2 2,81 JENDL 3
$^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$	$0,14 \pm 0,02$	0,16 ADL-3 0,28 JEF 2 0,23 JENDL 3 0,28 STAPRE
$^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}}\text{Rb}$	$0,08 \pm 0,01$	<b>0,07 STAPRE</b> 0,11 ADL-3



## 4.

## NEUTRONINDUKÁLT MAGREAKCIÓK HATÁSKERESZTMETSZETÉNEK SZISZTEMATIKUS VIZSGÁLATA NAGYSZÁMÚ IZOTÓPON

### Bevezetés

Ebben a fejezetben az elmúlt három évben kísérletileg mért differenciális és integrális  $(n,\alpha)$  és  $(n,p)$  reakciók hatáskeresztmetszetét tekintem át. A vizsgálat egyes szakaszait Valentina Semkovával (bolgár kutatóval) közösen végeztem.

A hélium és a hidrogén emisszióval járó neutronindukálta magreakciók gerjesztési függvényeinek vizsgálata igen lényeges egyrészt az elmélet szempontjából (pl. magreakció-modelleket ellenőrizhetünk), másrészt az aktivációs keresztmetszetek — különösen a reakcióküszöb és 20 MeV közötti neutronenergiára vonatkozók — felhasználásra kerülnek más tudományágakban (pl. nukleáris asztrofizika, anyagszerkezet-vizsgálat, dozimetria és terápia) illetve a nukleáris technológia terén (pl. sugárkárosodás becslése, hosszú felezési idejű radioaktív izotópok kezelése, izotóptermelés, elemösszetétel-analízis, gyorsítók tervezése).

A rendelkezésre álló adatbázisokat áttekintve láthatjuk, hogy mind a rövid [4.1], mind a hosszú [4.2] felezési idejű termékek keletkezésével járó  $(n,\alpha)$  és  $(n,p)$  magreakciók gerjesztési függvényei hiányosak — különösképpen a 8-12 MeV neutronenergia-tartományban — illetve a különböző szerzők adatai jelentős eltérést mutatnak. Az itt felsorakoztatott mérések erre a tartományra korlátozódnak, ahol is nagyon fontos az adatok kiegészítése.

A kimért vagy kiszámolt gerjesztési függvények jóságának igazolására vagy cáfolatára integrális tesztet alkalmazhatunk, mint ahogy azt az ittrium reakcióinak vizsgálatakor is tettük.

Abból a célból készült el ez a differenciális és integrális  $(n,\alpha)$  és  $(n,p)$  adatokat tartalmazó gyűjtemény, hogy ellenőrizhessük a rendelkezésre álló adatbankokat és a modellszámítások megbízhatóságát. A differenciális méréseket tekintve a következő reakciók hatáskeresztmetszeteit adom meg a 7-14,7MeV-ig terjedő neutron energiatartományban:  $^{90}\text{Zr}(n,\alpha)^{87\text{m}}\text{Sr}$ ,  $^{94}\text{Zr}(n,\alpha)^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89\text{m}+g}\text{Zr}$ ,  $^{45}\text{Sc}(n,\alpha)^{42}\text{K}$ ,  $^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$ ,  $^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ ,  $^{97}\text{Mo}(n,p)^{97\text{m}+g}\text{Nb}$ ,  $^{90}\text{Zr}(n,p)^{90\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{91}\text{Zr}(n,p)^{91\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Zr}(n,p)^{92}\text{Y}$ ,  $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60\text{m}+g}\text{Co}$ .

Ezen reakciók folytonos neutronspektrumra átlagolt hatáskeresztmetszetének mérését is elvégeztem, és kiegészítettem még az alábbi reakciókkal az integrális adatokat:  $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ ,  $^{68}\text{Zn}(n,\alpha)^{65}\text{Ni}$ ,  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ,  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58\text{m}+g}\text{Co}$ ,  $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ ,  $^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$ ,  $^{94}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$ ,  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ ,  $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46\text{m}+g}\text{Sc}$ ,  $^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$ ,  $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ ,  $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$ . A vastag berillium target bombázása ennél a méréssorozatnál 9,72 MeV energiájú deuteronokból álló nyalábbal történt.

Az integrális mérési adatokat az ENDF/B-VI, IRDF 90, JENDL-3, BROND, JEF-2, CENDL-2, ADL-3 adatbankokból és a SINCROS-II. rendszerből nyert adatok alapján számított integrális értékekkel vettem össze.

### A kísérleti megvalósítás

A mérésekhez nagy tisztaságú (Goodfellow), természetes izotóp-összetételű mintákat használtam. Ezek a 19 mm átmérőjű, vékony korong alakú fémek kerültek besugárzásra 6-10 óra hosszan, a neutronfluxustól és a neutronenergiától függően. A minták 0,25-1 mm vastagok voltak a detektálható gamma-energiától függően. A differenciális mérésekhez 7-12,5 MeV energiatarományban kellett neutronokat előállítani ciklotron segítségével, ez Debrecenben, az ATOMKI-ban történt az MGC-20 változtatható energiájú ciklotron és  $\text{D}_2$  gáztarget felhasználásával. A gázcella 4 cm hosszú és 4 cm átmérőjű,  $1,8 \cdot 10^5$  Pa nyomású deutériumgázzal volt töltve. A cellához egy 5  $\mu\text{m}$  vastag Nb-ablak tartozik, „beam stop” anyaga volfrám [4.3-4.6]. A minták a deuteronnyaláb irányához képest  $0^\circ$ -ban kerültek elhelyezésre a beam stop-tól 2-4 cm távolságban. Az átlagos targetáram kb 2  $\mu\text{A}$  volt. Fluxusmonitorként az  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  reakciót használtam.

A 14 MeV körüli neutronenergiák előállítása neutrongenerátorral történt (Debrecenben, a KLTE Kísérleti Fizikai Tanszékén) a  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$  reakció révén,  $180 \pm 5$  keV energiájú, mágnesesen analizált deuteronnyaláb és vastag TiT target segítségével, szórásmentes elrendezésben [4.7].  $10 \times 15$  mm, téglalap alakú Ni minták Al doziméter fóliák közé ágyazva kerültek elhelyezésre a  $\text{D}^+$  irányához képest különböző szögekben.

Az integrális tesztekhez folytonos spektrumú neutronforrásról kellett gondoskodni. A megvalósításra Debrecenben, az ATOMKI-ban került sor 9,72 MeV energiájú deuteronnyalábot és egy 3 mm vastagságú és 23 mm átmérőjű berillium targetet alkalmazva. Az elrendezés a jülich-i méréshez hasonló volt. A Be korong egy léghűtéssel ellátott réz tokban volt, ami vákuumra zárt. A mérésekhez nagy tisztaságú Fe, V, Co, Zn, Zr, Nb, Mo, Ni, Al és Sc fóliákat használtam. Ezek egyidejűleg kerültek besugárzásra, többször is. A mintacsomagokat 2,7 cm távolságra helyeztem el a „beam stop”-tól. Minden egyes csomagot ki kellett egészíteni a következő

monitorfóliákkal: Al, In, Fe, Ti, Au, Nb, Ni, Zr. Ezek szolgáltak arra, hogy a sokfóliás aktivációs technika és a SULSA unfolding módszer [4.8] segítségével meghatározzam a neutronspektrumot. A mintacsomagba három különböző pozícióba helyeztem alumínium fóliákat, így kimérhettem és figyelembe tudtam venni a neutronfluxus mintacsomagon belüli gyengülését.

Mind a differenciális, mind az integrális mérések során a neutronfluxus időbeli változásának regisztrálása  $\text{BF}_3$  („long counter”) számláló segítségével történt.

A besugárzott minták abszolút aktivitásának meghatározására HPGe és Ge(Li) detektorok valamint a hozzájuk tartozó számítógépes sokcsatornás analízátorok szolgáltak.

A csúcsterületeket az FGM spektrumillesztő és az ACCUSPEC programok segítségével határoztam meg. A következő korrekciókat vettem figyelembe: holtidő, valódi koincidencia, a mintában létrejövő önabszorpció. Megkülönböztetett figyelmet igényelt a kis energiájú „breakup” neutronoknak az aktivitáshoz való hozzájárulása. Ezért a  ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$  reakcióból származó neutronok spektrumát meg kellett határozni. Ez a már említett aktivációs unfolding módszerrel illetve PHRS segítségével történt. A breakup és a monoenergiás csúcs relatív járulékát az aktivitáshoz a neutron energia függvényében a  ${}^{58}\text{Ni}(n,p){}^{58}\text{Co}$  esetén Cs. Buczkó Margit és kollégái részletesen vizsgálták [4.10].

Általában a holtidő 4 % alatti volt. A hatáskeresztmetszetek teljes hibái a következő főbb hibaforrásokból tevődtek össze: részecskeszámlálás statisztikája, detektorhatásfok, a minta tömege, bomlási állandók, energia- és fluxus bizonytalanság, referencia hatáskeresztmetszet-adatok. A kísérletsorozatban részt vevő reakciókat és a mért reakciótermékekre vonatkozó bomlási adatokat [4.9] a 4.I. táblázatban sorolom fel.

A komplex bomlászörbe kimérésével interferáló gamma-vonalakat kellett különválasztani a következő reakciótermékek esetében:  ${}^{91}\text{Sr}$ — ${}^{91\text{m}}\text{Sr}$  és  ${}^{89}\text{Zr}$ — ${}^{92}\text{Nb}$ , amely izotópok a  ${}^{94}\text{Zr}(n,\alpha)$ — ${}^{91}\text{Zr}(n,p)$  és  ${}^{92}\text{Mo}(n,\alpha)$ — ${}^{92}\text{Mo}(n,p)$  reakciók végtermékei.

A 934 keV energiájú gamma-vonal jelenléte a háttérben szükségessé tette a komplex bomlászörbe kimérését a  ${}^{92}\text{Mo}(n,p){}^{92\text{m}}\text{Nb}$  reakció vizsgálatára során is.

## Eredmények

Az aktivációs egyenlettel meghatározott differenciális hatáskeresztmetszeteket a 4.II. táblázatban foglaltam össze. A csillaggal megjelöltek nem saját eredményeim, korábbi debreceni mérésekből vettem

[4.11]. Itt az a szerepük, hogy összefüggő adatsorrá egészítsék ki a rendelkezésre álló hatáskeresztmetszeteket.

Mért és számított gerjesztési függvényeket mutatnak be a 4.1.A-J ábrák, melyeken válogatott mérési irodalmi adatokat [4.12-4.19] tüntettem fel. Ily módon az ábrák jól illusztrálják, mely esetekben található egymással jól egyező adatokat illetve nagyobb eltéréseket.

A mérési adatok ellentmondásosak a  $^{91}\text{Zr}(n,p)^{91m}\text{Y}$ , a  $^{92}\text{Zr}(n,p)^{92}\text{Y}$  és a  $^{94}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$  reakciók esetén, sorrendben a 9-11 MeV, 5,5-6,5 MeV és a 14 MeV körüli neutronenergia-tartományokban. Az itt vizsgált reakciók mért, elméletileg számított és különféle adatbankok által generált gerjesztési függvényei a legtöbb esetben eltérőek.

A SINCROS-II rendszerrel elméletileg számított hatáskeresztmetszet-görbék a legtöbb esetben megfelelő pontossággal jósolják a kísérletileg mérhető értékeket, ám a  $^{90}\text{Zr}(n,p)^{90m}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$ ,  $^{90}\text{Zr}(n,\alpha)^{87m}\text{Sr}$  és  $^{97}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$  reakciók esetén az eltérés jelentős. A SINCROS-II rendszerrel Yamamuro végezte el a számításokat [4.20-4.23].

A spektrumra átlagolt hatáskeresztmetszetek alkalmasak a legjobb adatbankok kiválasztására illetve a differenciális adatok ellenőrzésére.

A mért spektrumra átlagolt hatáskeresztmetszeteket és azok hibáit a 4.III. és a 4.IV. táblázatokban foglaltam össze. Összehasonlításként megadtam azokat az értékeket is, amelyeket az ENDF/B-VI, IRDF 90, JENDL-3, BROND, JEF-2, CENDL-2, ADL-3 adatbankok és a SINCROS-II. rendszer gerjesztési függvényeit felhasználva számítottam ki az ismert összefüggés segítségével:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\int_0^{E_{\max}} \sigma(E) \phi(E) dE}{\int_0^{E_{\max}} \phi(E) dE} ,$$

$$\text{ahol } \int_0^{E_{\max}} \phi(E) dE = 1 . \quad /4.1/$$

A kísérletivel legjobban egyező adatokat vastag betűvel emeltem ki. Az ily módon kijelölt értékek a legtöbb esetben kielégítő egyezést mutatnak a kísérleti adatokkal. Természetesen a jól ismert dozimetriai reakciók esetében csaknem az összes számított érték is összhangban van egymással.

A  $^{90}\text{Zr}(n,\alpha)^{87m}\text{Sr}$ ,  $^{94}\text{Zr}(n,\alpha)^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+g}\text{Zr}$  és  $^{94}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$  esetében azonban további új számítások és mérések elvégzése szükséges.

A 4.III. és 4.IV. táblázatokban megjelölt adatkönyvtárak a továbbiakban standard dozimetriai adatoknak tekinthetők az egyes reakciók esetén.

**4.I. táblázat.** A differenciális és integrális vizsgálatok tárgyát képező reakciók és a reakciótermékek bomlási adatai

ReakcióHiba! A könyvjelző nem létezik.Hiba! A könyvjelző nem létezik.	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}$ (keV)	$I_{\gamma}$ (%)
$^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$	27.704 d	320.084	9.83
$^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$	1.821 d	983.501	100.0
		1037.4961	97.5
		1312.046	100.0
$^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$ $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	2.5785 h	846.812	98.9
$^{68}\text{Zn}(n,\alpha)^{65}\text{Ni}$	2.520 h	1115.584	14.8
		1481.90	23.5
$^{90}\text{Zr}(n,\alpha)^{87\text{m}}\text{Sr}$	2.795 h	388.40	82.3
$^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$ $^{90}\text{Zr}(n,p)^{90\text{m}}\text{Y}$	3.19 h	202.47	96.6
		479.49	91
$^{94}\text{Zr}(n,\alpha)^{91}\text{Sr}$	9.52 h	555.56	61.5
		749.72	23.6
		1024.28	33
$^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89\text{m+g}}\text{Zr}$	3.268 d	909.15	99.01
$^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$ $^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$	44.496 d	1099.251	56.5
		1291.596	43.2
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	14.659 h	1368.598	100
$^{45}\text{Sc}(n,\alpha)^{42}\text{K}$	12.360 h	1524.58	18.8
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58\text{m+g}}\text{Co}$	70.916 d	810.791	99.5
$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60\text{m+g}}\text{Co}$	5.271 y	1173.231	99.90
		1332.501	99.9824

$^{64}\text{Zr}(n,p)^{64}\text{Cu}$	12.701 h	1345.78	0.48
$^{91}\text{Zr}(n,p)^{91m}\text{Y}$	49.71 min	555.56	94.90
$^{92}\text{Zr}(n,p)^{92}\text{Y}$	3.54 h	934.53	13.9
$^{94}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$	18.7 min	918.74	56
$^{92}\text{Mo}(n,p)^{92m}\text{Nb}$	10.15 d	934.53	99.0
$^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$	23.35 h	460.01	28.5
		568.86	56.8
		778.196	96.88
		1091.316	48.5
$^{97}\text{Mo}(n,p)^{97m+g}\text{Nb}$	1.202 h	658.22	98.34
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46m+g}\text{Sc}$	83.83 d	889.25	99.984
		1120.51	99.987
$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$	3.341 d	159.381	68
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	1.821 d	983.501	100.0
		1037.4961	97.5
		1312.046	100.0

**4.II. táblázat.** A mért differenciális hatáskeresztmetszetek

Reakció	$E_n$ (MeV)	$\sigma$ (mb)
$^{45}\text{Sc}(n,\alpha)^{42}\text{K}$	11.34±0.22	45.6±2.3
	14.7±0.12	53.7±2.6*
$^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$	9.92±0.19	4.25±0.21
	11.19±0.20	7.15±0.36



$^{51}\text{V}(\text{n},\alpha)^{48}\text{Sc}$	11.34±0.22	7.02±0.84
	12.53±0.25	10.7±0.6
	14.7±0.12	17.0±1.0*
$^{59}\text{Co}(\text{n},\alpha)^{56}\text{Mn}$	11.34±0.22	27.7±1.4
$^{90}\text{Zr}(\text{n},\alpha)^{87\text{m}}\text{Sr}$	9.92±0.19	0.63±0.04
	11.19±0.20	1.63±0.12
	11.34±0.22	2.06±0.20
	12.53±0.25	2.33±0.18
	14.70±0.12	3.80±0.20*
$^{94}\text{Zr}(\text{n},\alpha)^{91}\text{Sr}$	11.34±0.22	1.77±0.09
	12.53±0.25	2.35±0.21
	14.70±0.12	4.70±0.12*
$^{92}\text{Mo}(\text{n},\alpha)^{89\text{m}+g}\text{Zr}$	8.97±0.18	7.97±0.7
	10.3±0.20	12.1±0.8
	11.19±0.22	13.1±1.1
	11.34±0.29	13.8±1.1
	12.53±0.30	19.7±1.5
	14.70±0.12	26.2±1.2*
$^{93}\text{Nb}(\text{n},\alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$	11.34±0.22	3.56±0.18
$^{90}\text{Zr}(\text{n},\text{p})^{90\text{m}}\text{Y}$	7.16±0.17	1.09±0.05
	9.92±0.19	2.70±0.27
	11.19±0.20	4.88±0.24
	11.34±0.22	6.59±0.5
	12.53±0.25	7.91±0.39

	14.70±0.12	13.3±0.7*
$^{91}\text{Zr}(\text{n,p})^{91\text{m}}\text{Y}$	7.16±0.17	1.68±0.2
	9.92±0.19	4.15±0.5
	11.34±0.22	9.6±0.5
	12.53±0.25	11.0±1.0
$^{92}\text{Zr}(\text{n,p})^{92}\text{Y}$	11.34±0.22	7.5±0.4
	14.70±0.12	20.0±1*
$^{92}\text{Mo}(\text{n,p})^{92\text{m}}\text{Nb}$	8.97±0.18	114±9
	10.30±0.20	116±6
	11.19±0.22	113±7
	12.53±0.30	112±7
	14.70±0.12	41±2.1*
$^{96}\text{Mo}(\text{n,p})^{96}\text{Nb}$	11.19±0.22	8.4±0.8
	11.34±0.29	8.5±0.9
	12.53±0.30	15.9±1.5
	14.70±0.12	25±1.3*
$^{97}\text{Mo}(\text{n,p})^{97\text{m+g}}\text{Nb}$	8.97±0.18	0.91±0.10
	10.30±0.20	2.7±0.2
	12.53±0.30	9.5±0.9
$^{60}\text{Ni}(\text{n,p})^{60\text{m+g}}\text{Co}$	13.82±0.08	164.2±8.5
	14.099±0.07	151.0±7.6
	14.67±0.135	140.6±7.3

4.III. táblázat. Be(d,n)-spektrumra átlagolt (n, $\alpha$ ) hatáskeresztmetszet értékek

Reakció	Mért (mb)	ENDF-B/VI	IRDF90	JEF-2	JENDL3	CENDL2	SINCROS II.	ADL-3	BROND
$^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$	<b>7.80<math>\pm</math>0.80</b>	9.96		10.11	9.62			11.24	<b>7.25</b>
$^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$	<b>0.61<math>\pm</math>0.06</b>		<b>0.62</b>		0.67		0.52	0.47	
$^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$	<b>2.10<math>\pm</math>0.18</b>	2.35	2.40	2.35	2.45	2.40		<b>2.13</b>	
$^{68}\text{Zn}(n,\alpha)^{65}\text{Ni}$	<b>0.67<math>\pm</math>0.07</b>						<b>0.86</b>	0.42	
$^{90}\text{Zr}(n,\alpha)^{87\text{m}}\text{Sr}$	<b>0.12<math>\pm</math>0.02</b>						<b>0.08</b>	0.18	
$^{94}\text{Zr}(n,\alpha)^{91}\text{Sr}$	<b>0.17<math>\pm</math>0.02</b>	<b>0.13</b>		0.10	0.12		<b>0.13</b>	0.10	0.32

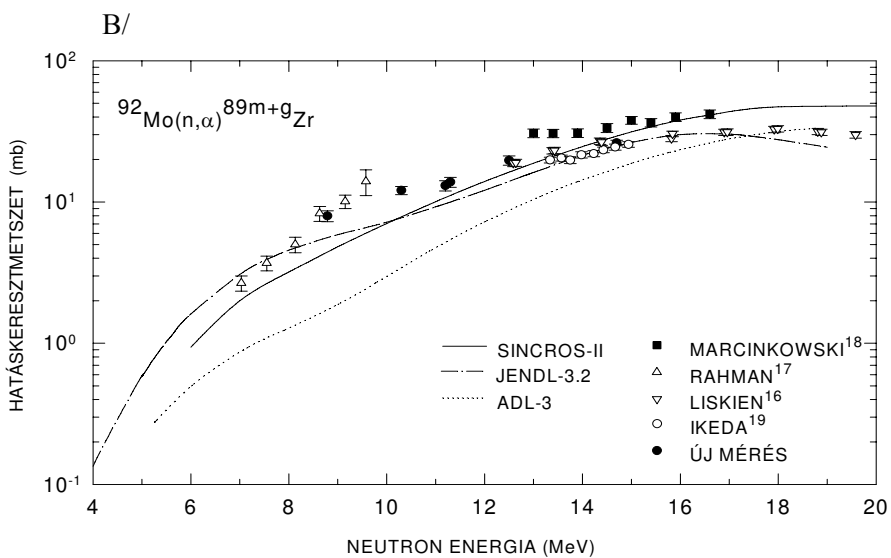
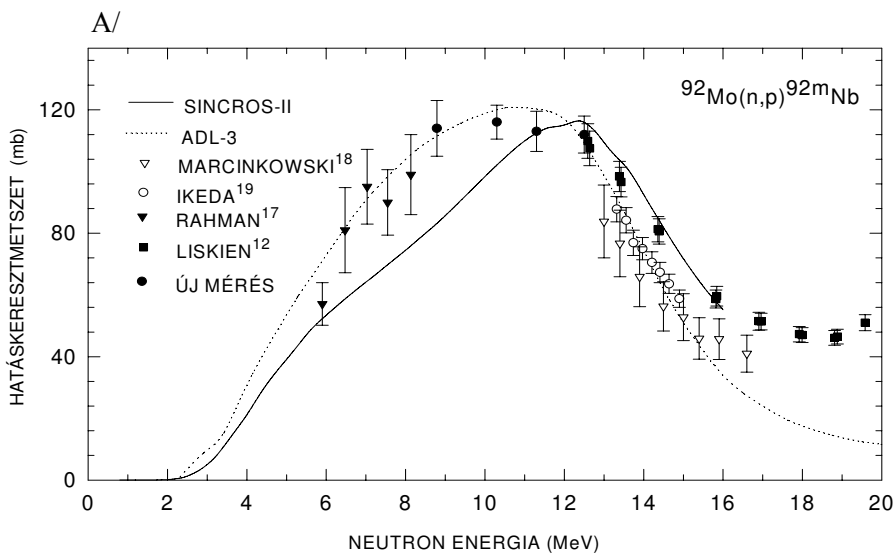
$^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$	$0.23 \pm 0.03$							<b>0.17</b>	
$^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89\text{m}+g}\text{Zr}$	$0.93 \pm 0.10$			1.30	1.53		1.35	<b>0.64</b>	
$^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$	$0.81 \pm 0.09$	0.89		0.89	<b>0.88</b>			0.72	0.94
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	$12.2 \pm 1.3$	11.86	12.14	11.94	11.50	11.93	11.89	<b>12.18</b>	
$^{45}\text{Sc}(n,\alpha)^{42}\text{K}$	$3.05 \pm 0.40$	4.78			6.88			<b>3.25</b>	

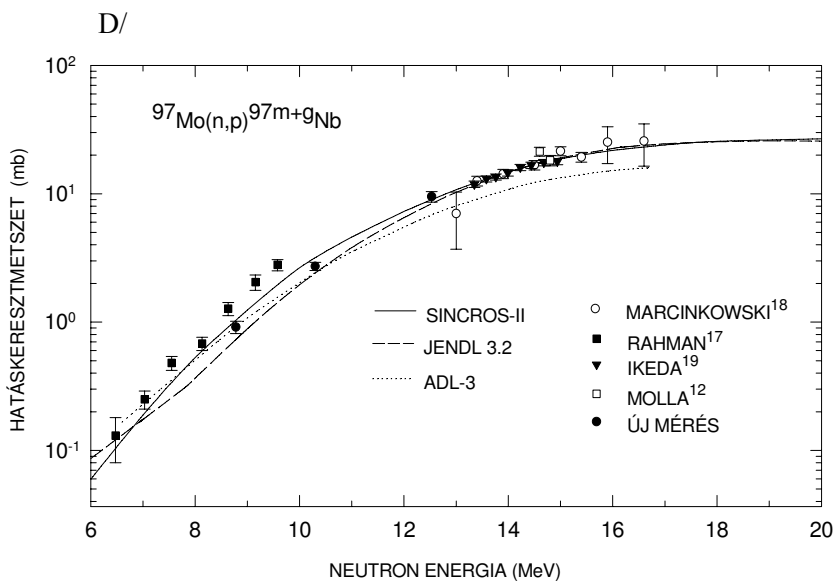
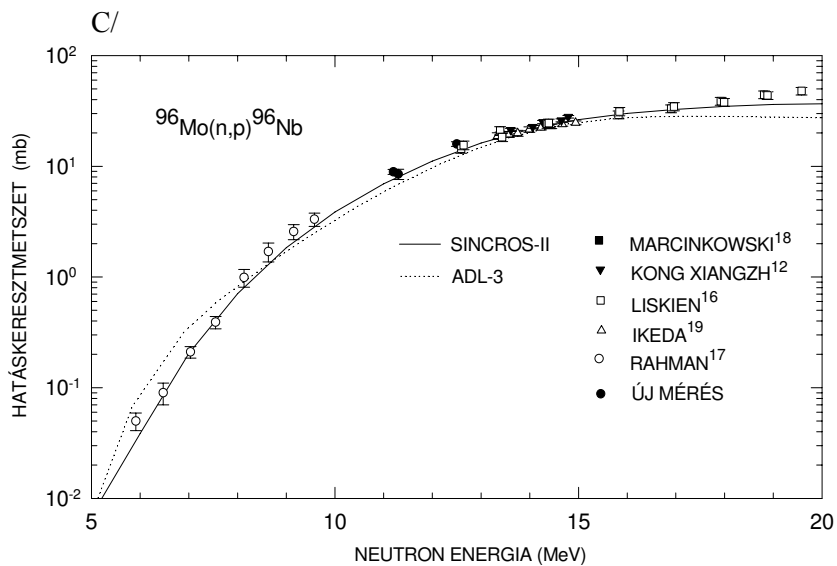
4.IV. táblázat. Be(d,n)-spektrumra átlagolt (n,p) hatáskeresztmetszet értékek

Reakció	Mért (mb)	ENDF-B/VI	IRDF90	JEF-2	JENDL3	CENDL2	SINCROS II.	ADL-3	BROND
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$	<b>325.65<math>\pm</math>30</b>	316.41	320.52	316.41	312.74			201.46	<b>324.02</b>
$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60m+g}\text{Co}$	<b>18.54<math>\pm</math>1.9</b>	<b>19.43</b>	19.81	<b>19.43</b>	25.56			10.91	25.84
$^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$	<b>111.34<math>\pm</math>10</b>		<b>119.00</b>	135.86			126.81	133.01	
$^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$	<b>9.01<math>\pm</math>0.9</b>	<b>9.01</b>		<b>9.01</b>	9.02	8.77		13.55	
$^{90}\text{Zr}(n,p)^{90m}\text{Y}$	<b>0.56<math>\pm</math>0.05</b>						<b>0.48</b>	5.49	
$^{91}\text{Zr}(n,p)^{91m}\text{Y}$	<b>0.86<math>\pm</math>0.09</b>						<b>0.81</b>	2.99	
$^{92}\text{Zr}(n,p)^{92}\text{Y}$	<b>0.59<math>\pm</math>0.06</b>	0.87		0.77	<b>0.58</b>		0.63	0.41	0.52

$^{94}\text{Zr}(\text{n,p})^{94}\text{Y}$	<b>0.12</b> <del>±0.02</del>	0.30		0.29	0.14		0.11	<b>0.12</b>	0.17
$^{92}\text{Mo}(\text{n,p})^{92\text{m}}\text{Nb}$	<b>34.42</b> <del>±4.0</del>						<b>30.28</b>	40.21	
$^{96}\text{Mo}(\text{n,p})^{96}\text{Nb}$	<b>0.62</b> <del>±0.07</del>			0.84	0.64		0.66	<b>0.62</b>	
$^{97}\text{Mo}(\text{n,p})^{97\text{m+g}}\text{Nb}$	<b>0.43</b> <del>±0.05</del>			1.02	<b>0.40</b>		<b>0.46</b>	0.37	
$^{56}\text{Fe}(\text{n,p})^{56}\text{Mn}$	<b>11.87</b> <del>±1.3</del>	<b>12.41</b>	12.64	15.03	12.90			13.68	13.38
$^{46}\text{Ti}(\text{n,p})^{46}\text{Sc}$	<b>75.77</b> <del>±8.3</del>	<b>68.68</b>	66.13		67.29			48.66	
$^{47}\text{Ti}(\text{n,p})^{47}\text{Sc}$	<b>51.39</b> <del>±5.7</del>	61.89	<b>52.68</b>		67.32			93.21	
$^{48}\text{Ti}(\text{n,p})^{48}\text{Sc}$	<b>4.60</b> <del>±0.5</del>	<b>4.59</b>	4.51		3.74			4.30	

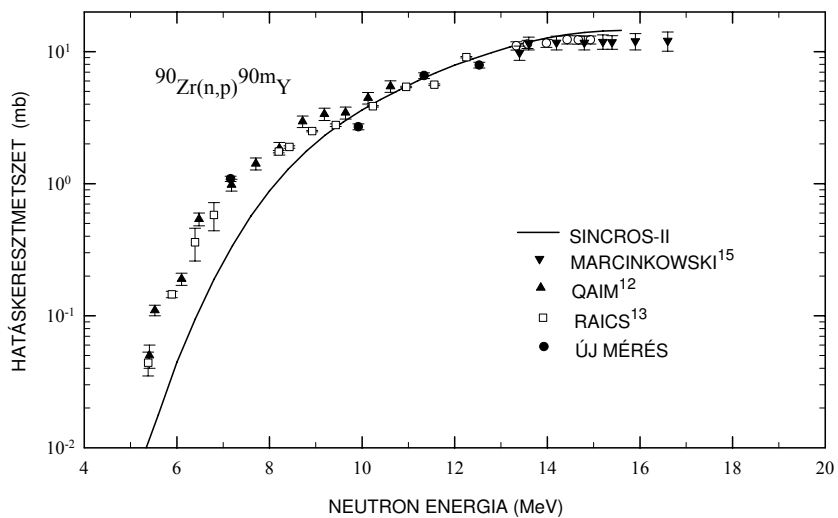
## 4.1. A-J ábrák. A vizsgált reakciók gerjesztési függvényei



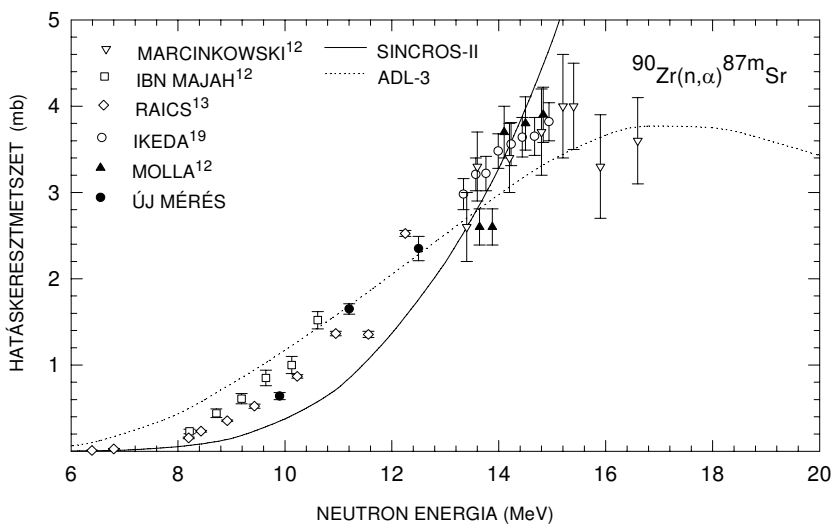


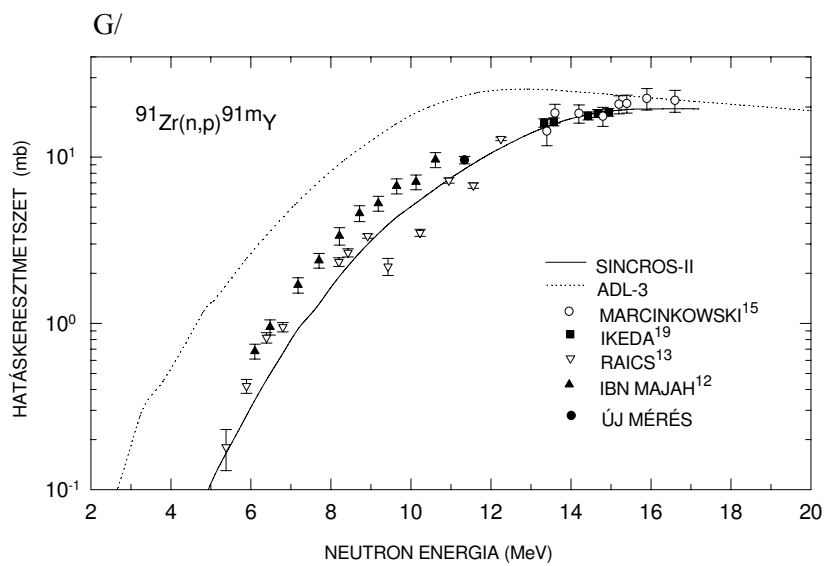


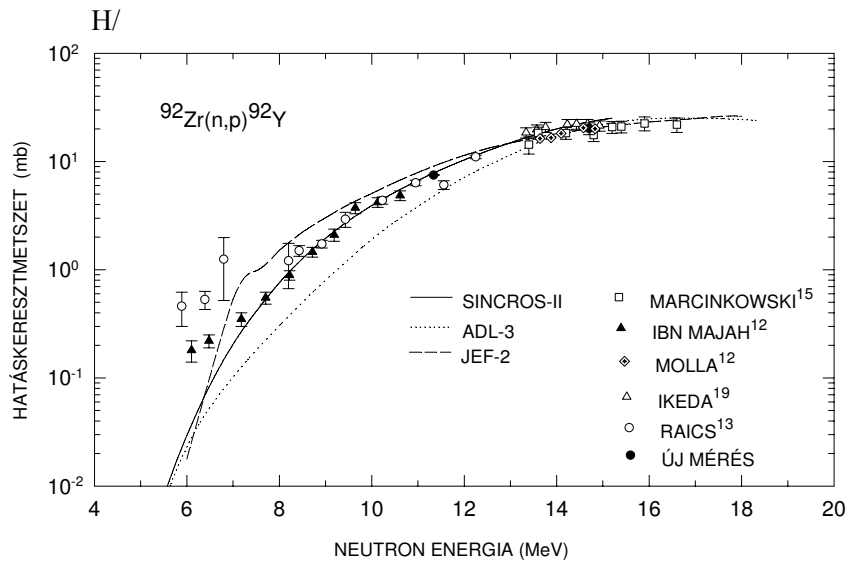
E/

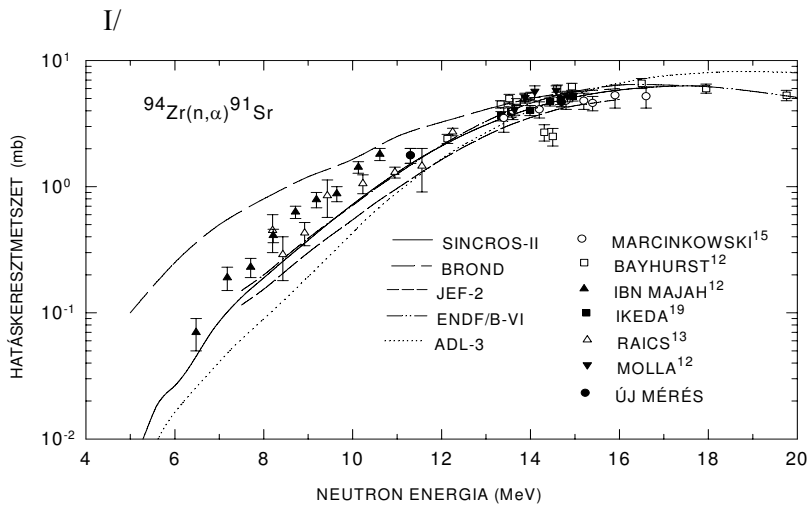


F/

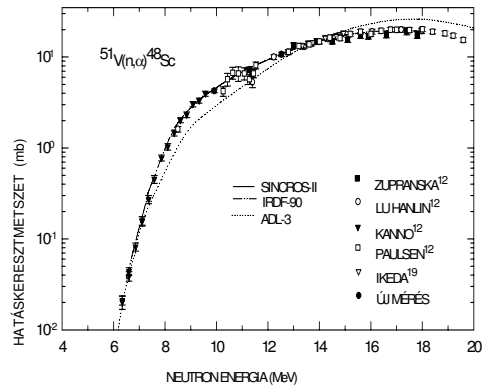








J/



## 5.

## AZ (n,p) ÉS (n, $\alpha$ ) REAKCIÓK VIZSGÁLATA $E_n = 14$ MeV KÖRÜLI ENERGIÁKNÁL

### Előszó

A neutronindukált magreakciók hatáskeresztmetszetének meghatározása több okból is igen lényeges 14 MeV neutronenergia környékén. Egyrészt, hogy megértsük a magreakciók lényegét, ellenőrizhessük a különböző magreakció-modellek alkalmazhatóságát, másrészt, hogy adatokat szolgáltatassunk fúziós reaktorok tervezéséhez, hiszen meg kell becsülni a létrejövő aktivitás nagyságát, a termelődött gáz mennyiségét, a neutron sokszorozást, a sugárzási károsodást; a relatív gerjesztési függvényekhez abszolút referencia-adatokat kell szolgáltatni, valamint egyre nagyobb az igény a nemzetközi adatbankok (pl. ENDF, JENDL stb.) ajánlásainak ellenőrzésére.

A magreakciók teljes gerjesztési függvényére szükség lenne bizonyos esetekben, például a szerkezeti anyagokra, hiszen így a neutronfluxus hely- és energia szerinti eloszlását meghatározva a reakció sebesség térbeli eloszlására a szükséges számítások elvégezhetők. A teljes függvény kimérése igen nagy számú, költséges mérés elvégzését kívánna, ezért jelentős az elméleti számítások ellenőrzése.

Nagy probléma, hogy még 14 MeV neutronenergiánál is hiányosak az adatok, illetve szórást mutatnak attól függetlenül, hogy azok régiak vagy újak. Ezért nagy jelentőségű a neutrongenerátorral elvégezhető szisztematikus mérés, a meglévő irodalmi adatok feldolgozása, új szisztematikák felismerése, illetve a korábbiak ellenőrzése.

Az (n,p) reakcióadatok feldolgozása önálló munkám, ezért a dolgozatomban részletesen foglalkozok a témával, ezen kívül az (n, $\alpha$ ) szisztematika kidolgozásában is részt vettem, amelynek vázolómat a legfontosabb eredményeit, és itt utalni szeretnék egy közös publikációra, ahol a részletes leíráson kívül a javasolt (n, $\alpha$ ) hatáskeresztmetszet-értékek is megtalálhatók: A. D. Majdeddin, V. Semkova, R. Dóczi, Cs. M. Buczkó and J. Csikai: Investigations on (n, $\alpha$ ) cross sections in the 14 MeV Region [5.15].

## Kísérleti megvalósítás

A szisztematikák alapját képező kísérleti adatok jelentős részét a KLTE Kísérleti Fizikai tanszékén határoztuk meg. A mérések egy részében magam is részt vettem (ld 3-4. fejezet), más részük a munkám elkezdésekor már rendelkezésemre állt.

A besugárzásokhoz nagy tisztaságú (Goodfellow), természetes izotópösszetételű, vékony fémfóliákat készítettünk elő, amelyeket 19 mm átmérőjű korong, illetve 10x15 mm-es téglalap alakúra vágunk. Ezeken kívül szintén 19 mm átmérőjű korongra préselt fém-oxid porok is felhasználásra kerültek. A minták vastagsága általában 0,2 és 1 mm között változott a detektálandó gamma-energiáknak megfelelően. Béta- röntgen- és lágy gamma-sugárzások detektálása esetén vékony, 0,05-0,2 mm-es mintákat kellett választani.

A neutronokat a  ${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$  reakció révén,  $180\pm 5$  keV mágnesesen analizált deuteronnyaláb és vastag TiT target segítségével állítottuk elő, szórásmentes elrendezésben [5.10]. A neutronenergia aszerint változott, hogy a bejövő deuteronnyaláb irányához képest milyen szögekben helyeztük el a doziméterfóliák közé helyezett mintákat.

Nézzünk néhány jellemző értéket! Az átlagos neutronenergia és annak szórása az 5.I. táblázatban tekinthető meg kb. 0,1 sr térszögű besugárzási geometriát tekintve.

**5.I. táblázat.** Az alkalmazott neutrongenerátorra vonatkozó tipikus kísérleti paraméterek

Szög (fok)	0	30	60	90	120	150	180
Átlagos neutronenergia (MeV)	14,78	14,68	14,42	14,07	13,73	13,49	13,40
Szórás (MeV)	0,17	0,15	0,12	0,08	0,10	0,12	0,13

Az adatok azt jelzik, hogy a neutronok energiaszórása kb 0,5-1 % közé esik a 14 MeV-os tartományban.

A nehéz elemek esetén létrejövő kis hatáskeresztmetszetű  $(n,\alpha)$  reakciók vizsgálatához kiterjedtebb minták szükségesek, amelyeken belül a fluxussűrűség-spektrum  $\Phi(E)$  jelentékenyen megváltozhat [5.93]. Ezért az aktivációs unfolding módszert tovább kellett fejleszteni a térfogatra átlagolt  $\Phi(E)$  függvény meghatározásához [5.94]. A neutronspektrum alakja 12 különböző küszöbenergiájú reakció segítségével került meghatározásra. Ezen reakciók hatáskeresztmetszet-görbéit az IRDF 90 dozimetriai fájlból vettük.

A besugárzott minták abszolút aktivitását Ge(Li), HPGe és NaI gamma-spektrométerekkel mértük. A csúcsterület analizálását IBM kompatibilis személyi számítógépekre írt ACCUSPEC nevű program segítségével határoztuk meg.

A lágy gamma- és röntgensugarak detektálása berilliumablakos HPGe illetve Si(Li) detektorral történt. A béta-részecskék számlálására egy  $4\pi$  proporcionális számláló és egy végablakos GM-cső szolgált. A besugárzás alatt a neutronfluxus időbeli változását egy BF<sub>3</sub> „long counter”-rel regisztráltuk.

A számítások során a következő korrekciókat vettük figyelembe: a neutronfluxus időbeli változása, a gamma- béta- és röntgensugarak önabszorpciója, valódi koincidencia, holt idő, a besugárzás és a mérés geometriája, a neutronok mintán belüli abszorpciója [5.93-5.95].

A hatáskeresztmetszet-adatok hibáinak fő forrásai a következők: a számlálás statisztikája, a detektor hatásfoka, a minta tömege, a bomlásállandók, az energia és a fluxus bizonytalansága, az alacsony energiájú neutronok hatása [5.62], a dozimetriai reakciók hatáskeresztmetszetének a hibája. A reakciótermékekre vonatkozó, a bomlásra jellemző adatokat a [5.96-5.98] irodalmakból vettük.

### Az (n,p) reakciók hatáskeresztmetszetének vizsgálata 14 MeV neutronenergia környékén

#### *Bevezetés*

Jelentős mennyiségű publikációt találhatunk, amelyek elemekre illetve izotópokra mért vagy számított hidrogénemissziós hatáskeresztmetszetekről számolnak be [5.1-5.14]. Ezek az adatok többek között azért szükségesek, hogy megbecsülhessük a különféle reaktor szerkezeti anyagok sugárkárosodását, valamint hogy kiegészíthessük a neutron aktivációs hatáskeresztmetszet adatbázist, amelyet aztán a nukleáris technikával kapcsolatos tervezési feladatok megoldására használnak.

A hosszú felezési idejű termékek keletkezésével járó magreakciók hatáskeresztmetszetének meghatározása kiemelkedő jelentőségű a reaktortechnikában. Pontos 14 MeV neutronenergiára vonatkozó adatok



szükségesek a különféle adatbázisok ellenőrzéséhez, valamint a gerjesztési függvények normálásához.

A precíz (n,p) hatáskeresztmetszetekre alapozva számos tanulmány [5.11; 5.27; 5.81; 5.83-5.87] foglalkozik az izotóp- és aszimmetria-paraméter függésen alapuló szisztematikák javításával. A megbízható elméleti és empirikus formulák nélkülözhetetlenek, hogy megbecsülhessük a hatáskeresztmetszeteket olyan esetben, ha kísérleti adat nem áll rendelkezésünkre.

### *Eredmények*

Összegyűjtöttem az előzőekben leírt kísérleti módszerekkel Debrecenben megmért hatáskeresztmetszet adatokat, majd ezeket kiegészítettem a legfrissebb irodalmi értékekkel, hogy elkészíthessem az ajánlott értékek összefüggő adatsorát. A hatáskeresztmetszetek szisztematikus tanulmányozása azt mutatta, hogy néhány esetben igen nagy szórást mutatnak a különféle irodalomból vett értékek. Ennek oka nagyrészt az eltérő kísérleti körülményekben, a különféle felhasznált referencia-reakciókban és az elfogadott bomlási adatokban keresendő. Forrest módszeréhez [5.11] hasonlóan az ajánlott hatáskeresztmetszeteket a legfrissebb adatok [5.8-12; 5.16-80] átlagaként adtam meg. Kizártam azokat az értékeket, amelyek az átlagtól irreálisan nagy (>50%) eltérést mutattak. Az ajánlott (n,p) hatáskeresztmetszeteket az 5.II. táblázatban foglaltam össze.

Meg kell jegyezni, hogy az irodalmakban fellelhető 14 MeV neutronenergia környékén mért kísérleti adatok extrapolálhatók a kívánt neutronenergiára a következő kifejezés [5.27] segítségével, melyben  $m_r$  a gerjesztési függvény meredeksége:

$$m_r (\%/MeV) = -19.1 + 137.8S + 1207S^2, \quad /5.1/$$

és ahol  $S = (N-Z)/A$  az aszimmetria-paraméter.

Kasugai és munkatársai [5.27] felállítottak egy empirikus formulát (5.2. egyenlet), amellyel széles tömegszám-tartományban ( $A = 19-187$ ) adhatók meg 14 MeV neutronenergiára vonatkozó hatáskeresztmetszet-értékek:

$$\sigma_{14} (\text{mb}) = 1830(N-Z+1)\exp(-50.7(N-Z+1)/A) . \quad /5.2/$$

Az /5.1/-es és /5.2/-es összefüggések alkalmazhatók 14 MeV neutronenergia környéki hatáskeresztmetszetek becslésére.

Az (n,α) reakciókhoz hasonlóan [5.15] az összegyűjtött (n,p) hatáskeresztmetszet-adatok izotópfüggése jól közelíthető a következő összefüggéssel:

$$\sigma_{n,p}(A)_{Z=\text{const}} = ae^{-bS-cS^2}, \quad /5.3/$$

ahol a, b és c illesztési paraméterek. Az /5.3/formula hátránya, hogy csak legalább három stabil izotóppal rendelkező elemekre alkalmazható.

Az 5.1. ábrán látható néhány példa a  $\sigma_{n,p}(A)$  függvény menetére. Amint az ábrából is kitűnik, a  $\sigma_{n,p}$  értékek izotópfüggése féllogaritmikus ábrázolásban nem lineáris.

Az /5.3./ egyenletet felhasználva 61 ismeretlen (n,p) adatot származtattam, amelyek mérése lehetetlen vagy nehézkes lett volna kedvezőtlen bomlási sajátságok miatt. Ezeket a hatáskeresztmetszeteket az 5.III. táblázatban tüntettem fel.

A totális (n,p) hatáskeresztmetszetet a  $\sigma_{n,p}$  értékek izotópgyakorisággal súlyozott átlagaként határoztam meg 54 elem esetén. Ezek az adatok az 5.IV. táblázatban található.

Az ajánlott  $\sigma_{n,p}$  értékek és a  $\sigma_{n,p-em}$  emissziós mérések révén nyert adatok [5.1-5.14] összehasonlításából kitűnik, hogy a (n,np) reakciók létrejöttének valószínűsége még közepes és nehéz magok esetén is számottevő.

Az 5.II. és az 5.III. táblázatok hatáskeresztmetszet-adatait az 'S' aszimmetria-paraméter függvényében ábrázolva az értékeket a Levkovskij [5.81-5.82] által megadott empirikus kifejezéssel közelíthetjük. Ha az exponenciális tényező szorzójaként ( $B(A)$ ) és az exponensben egy további tag szerepel /5.4/, az illesztés javítható.

$$\sigma_{n,p} = a(A^{1/3} + 1)^2 e^{-b(S + S^2)} = aB(A)e^{-b(S + S^2)}. \quad /5.4/$$

A paraméterek értékeire a következőket kaptam:

$$a = 23,659 \pm 1,128 \text{ és } b = 23,041 \pm 0,507.$$

Kiküszöbölhető az /5.4/ egyenlet két paramétertől való függése, hogyha a  $\sigma_{n,p}$  értékeit elosztjuk a B kifejezéssel:

$$R = \sigma_{n,p} / (A^{1/3} + 1)^2 = e^{-bS + cS^2} \quad /5.5/$$

Ez utóbbi illesztést és az illesztési paramétereket az 5.2. ábrán tüntettem fel. Az ábráról leolvasható, hogy mágikus rendszámú és deformált magok esetén szembetűnő a trendtől való eltérés. Az adatok illesztése esetünkben a legkisebb négyzetek módszerével történt.

Ahhoz, hogy a különböző szerzők által felállított szisztematikák közül a legmegfelelőbbet tudjuk kiválasztani, a következőképpen megadható 'F' mennyiséget számoltam ki:

$$F = \Sigma(|\sigma_{\text{kísérleti}} - \sigma_{\text{számított}}|) / \sigma_{\text{számított}} \quad /5.6/$$

Az F/n mennyiséggel jellemezhetjük a formulák jóságát, itt 'n' a hatáskeresztmetszet adatok száma az adott szisztematika által átfogott intervallumban.

Az 5.V. táblázatból leolvasható, hogy Eder [5.83], Bychkov [5.84], Forrest [5.11], Ait-Takar [5.85], Kasugai [5.27] és munkatársaik által megadott empirikus formulák jól adják vissza az ajánlott (n,p) hatáskeresztmetszeteket széles rendszám- és tömegszám tartományban anélkül, hogy az adatsort részekre osztanák. Meg kell jegyezni, hogy azok a formulák, amelyek egy-egy szűkebb rendszám- vagy tömegszám tartományra érvényesek, jobban illeszkednek adatainkra. Az 5.3. ábrán látható hisztogramok a különböző szerzők által publikált, és az 5.II. és 5.III. táblázatban található adatok összhangját jellemzik.

Az  $\sigma_{n,p}$  adatok szisztematikus tanulmányozása lehetővé tette, hogy hosszú felezési idejű target- illetve termékmagok esetére (n,p) hatáskeresztmetszeteket becsüljek meg. Ezek az adatok az 5.VI. táblázatban találhatóak.

Meg kell jegyezni, hogy a SINCROS-II rendszer [5.88] jelenlegi változata 50 MeV neutronenergiáig alkalmas az (n,p) hatáskeresztmetszet-görbe leírására. A SINCROS-II számítások [5.89-5.91] jól egyeznek a 14 MeV-os adatokkal is.

#### Az (n, $\alpha$ ) hatáskeresztmetszetek analiziséből levonható néhány következtetés

Az összegyűjtött (n, $\alpha$ ) hatáskeresztmetszetek ebben az esetben is kiegészültek a /3/ egyenlet segítségével származtatott értékekkel. Az így nyert adatbázis illesztésére szintén a /4/-es formula szolgált. A paraméterek értékei (n, $\alpha$ ) szisztematika esetén:

$$a = 15,070 \pm 0,53 \quad b = 27,55 \pm 0,754$$

Az illesztés jóságát jellemző F/n értéke: 0,322.

Az ajánlott adatokat összevetve a teljes hélium emisszió mérésen alapulókkal, az állapítható meg, hogy az (n, $n\alpha$ ) reakciók hatáskeresztmetszet-értéke elhanyagolható, kivéve, ha a targetmag könnyű.

**5.II.táblázat.** Ajánlott értékek (n,p) hatáskeresztmetszetekre  
( $14.7 \pm 0.2$ ) MeV neutron energiánál

Target	Z	A	$\sigma \pm \Delta\sigma$ (mb)
B	5	11	$4.2 \pm 0.2$
N	7	14	$45.2 \pm 6$
O	8	18	$2.3 \pm 0.5$
F	9	19	$18.6 \pm 0.88$
Na	11	23	$47.0 \pm 2$
Mg	12	24	$183.6 \pm 9$
		25	$88.04 \pm 13$
		26	$39 \pm 11$
Al	13	27	$70 \pm 2$
Si	14	28	$238.7 \pm 30$
		29	$135.33 \pm 15$
		30	$70.04 \pm 20$
P	15	31	$91.85 \pm 3.48$
S	16	32	$237 \pm 25$
		33	$134 \pm 22$
		34	$78 \pm 8$
Cl	17	35	$110 \pm 10$
		37	$25.4 \pm 3$
K	19	39	$314 \pm 14$
		41	$51.36 \pm 3$
Ca	20	40	$470.01 \pm 50$
		42	$178.25 \pm 12$
		43	$99.83 \pm 13$
		44	$43.27 \pm 6$

Sc	21	45	57±8
Ti	22	46	251±13
		47	136±9
		48	57.2±2.7
		50	11.9±6
V	23	51	33.3±1.7
Cr	24	50	294±30
		52	80±4
		53	42±2.1
		54	17.4±1
Mn	25	55	45±10
Fe	26	54	350±15
		56	115±6
		57	59±4
Co	27	59	51±1
Ni	28	58	366±19
		60	148±8
		61	64±4
		62	37±4
Cu	29	63	70±13
		65	20.93±4
Zn	30	64	185±10
		66	73.3±8
		67	37.9±6
		68	15.2±2.5
Ga	31	69	64±5
		71	20.5±1.5
Ge	32	70	74±8
		72	31.6±1.4
		73	19.4±1.1
		74	10.1±0.5

		76	2.8±0.4
As	33	75	18.7±2.1
Se	34	74	112±7
		76	49±3
		78	19±1.1
Br	35	81	21±5
Kr	36	80	45±6
		82	23±5
		84	11±2
		86	5±1.5
Sr	38	84	95±8
		86	44±4
		88	17.4±2
Y	39	89	22.2±4.2
Zr	40	90	37±5
		91	29±4
		92	20.23±2.5
		94	7.5±1.1
Mo	42	95	41.3±2
		96	21.3±1.1
		97	14.6±0.8
Ru	44	96	146±8
		101	21.2±1.2
		104	6±0.7
Rh	45	103	17±3
Pd	46	102	93.6±15
		104	58±15
		105	38±2.9
Pd	46	106	22.5±6
		108	4±1
		106	130±24

Cd	48	111	23.25±2.1
		112	16.1±3
Cd	48	114	8.5±1.3
		116	2.96±0.3
In	49	115	13.26±2.95
Sn	50	116	14.6±2
		117	11.7±0.6
		119	7.1±0.8
		120	4.5±0.5
Te	52	122	10.5±1.5
		126	4.7±0.2
		128	2.9±0.1
		130	1.7±0.1
I	53	127	11.7±2
Xe	54	128	27±4
		131	6.1±0.6
Cs	55	133	10.5±2
Ba	56	132	15.3±3.5
		136	4.8±0.7
		138	2.18±0.15
La	57	139	4.5±1.1
Ce	58	140	7.05±0.7
		142	4.8±0.8
Pr	59	141	11.5±0.9
Nd	60	142	13.7±1.1
		143	11.5±2.3
		144	9.8±1.5
		145	7.25±1.6
		146	4.5±0.7
Sm	62	144	19±4
		148	9.8±0.8

		150	$7\pm 0.6$
Eu	63	153	$4.2\pm 0.4$
Gd	64	157	$5.4\pm 1.1$
		158	$3.2\pm 1.2$
Tb	65	159	$5.1\pm 0.4$
Dy	66	158	$10.6\pm 1.2$
		160	$7\pm 1.5$
		162	$4.3\pm 1$
		164	$2.55\pm 0.5$
Er	68	166	$4.5\pm 0.7$
		167	$3.4\pm 0.3$
Er	68	168	$2.8\pm 0.4$
Yb	70	174	$3\pm 0.2$
Lu	71	175	$4\pm 0.7$
Ta	73	181	$2.94\pm 0.18$
W	74	182	$6.5\pm 0.5$
		184	$2.61\pm 0.12$
		186	$1.25\pm 0.25$
Re	75	187	$3.73\pm 0.28$
Os	76	184	$9.30\pm 2$
		188	$4\pm 0.8$
		190	$2.2\pm 0.5$
		192	$1\pm 0.03$
Au	79	179	$2\pm 0.5$
Hg	80	196	$9.3\pm 1$
		198	$4.5\pm 0.8$
		199	$2.5\pm 0.5$
Tl	81	203	$4.2\pm 0.8$
		205	$1.9\pm 0.2$
Bi	83	209	$0.8\pm 0.3$



**5.III. táblázat.** Az /5.3/ egyenlet alapján származtatott (n,p) hatáskeresztmetszet adatok ( $14.7 \pm 0.2$ ) MeV neutron energiánál

Target	Z	A	$\sigma$ (mb)
S	16	36	28.6
Ca	20	46	9.2
		48	1.5
Ti	22	49	23.1
Fe	26	58	28.4
Ni	28	64	3.75
Zn	30	70	2.15
Se	34	77	30.9
		80	6.7
		82	2.16
Kr	36	78	81.4
		83	16
Sr	38	87	28.4
Zr	40	96	1.93
Mo	42	92	186.7
		94	69.4
		98	7
		100	1.96
Ru	44	98	68.1
		99	46.3
		100	31.3
		102	14.1
Pd	46	110	0.82
		108	66.7

Cd	48	110	33.3
		113	11.3
Sn	50	112	41.6
		114	25
		115	19.3
		118	8.7
		122	2.9
		124	1.68
Te	52	120	14.3
		123	8.8
		124	7.2
		125	5.9
Ba	56	130	24.8
		134	8.7
Ba	56	135	6.4
		137	3.3
Nd	60	148	3.3
		150	1.9
Sm	62	147	11.6
		149	8.3
		152	5
		154	3.5
Dy	66	156	15.2
		161	5.5
		163	3.3
Er	68	162	11.4
		164	7.2
		170	1.66
W	74	180	15.2
		183	4.2
Os	76	186	5.96
		187	4.7

		189	2.9
Hg	80	200	1.85
Hg	80	201	1.22
		202	0.8
		204	0.34

**5.IV.táblázat.** Az elemek totális (n,p) hatáskeresztmetszete  
( $14.7 \pm 0.2$ ) MeV neutron energiánál

Elem	Z	$\sigma_{\text{tot}}$ (mb)
N	7	$45.2 \pm 6$
O	8	$2.3 \pm 0.5$
F	9	$18.6 \pm 0.9$
Na	11	$47.0 \pm 2$
Mg	12	$158.0 \pm 10$
Al	13	$70.0 \pm 2$
Si	14	$231.4 \pm 30$
P	15	$91.9 \pm 3.5$
S	16	$229.5 \pm 25$
Cl	17	$89.5 \pm 10$
K	19	$296.3 \pm 14$
Ca	20	$457.8 \pm 50$
Sc	21	$57.0 \pm 8$
Ti	22	$74.9 \pm 12$
V	23	$33.3 \pm 1.7$
Cr	24	$84.2 \pm 18$

Mn	25	45.0±10
Fe	26	127.3±15
Co	27	51.0±1
Ni	28	290.1±19
Cu	29	54.9±13
Zn	30	114.7±10
Ga	31	46.6±5
Ge	32	29.8±8
As	33	18.7±2.1
Se	34	16.0±4
Kr	36	13.0±3
Sr	38	21.2±5
Y	39	22.2±4.2
Zr	40	27.1±5
Mo	42	47.5±2
Ru	44	28.3±4
Rh	45	17.0±3
Pd	46	23.2±4
Cd	48	17.2±5
Sn	50	8.1±2
Te	52	3.5±1
I	53	11.7±2
Cs	55	10.5±2
Ba	56	3.0±0.7
La	57	4.5±1.1
Pr	59	11.5±0.9
Nd	60	9.1±1.5
Sm	62	7.2±1
Tb	65	5.1±0.4
Dy	66	3.9±1
Er	68	3.4±0.7

Ta	73	$2.9 \pm 0.2$
W	74	$3.5 \pm 0.5$
Os	76	$2.2 \pm 0.6$
Au	79	$2.0 \pm 0.5$
Hg	80	$1.7 \pm 0.5$
Tl	81	$2.6 \pm 0.3$
Bi	83	$0.8 \pm 0.3$

**5.V. táblázat.** Az (n,p) szisztematikák összehasonlítása (14.7±0.2) MeV neutron energiánál

Szerző	Formula, $\sigma$ (mb)	Tömegszá m	n*	F/n
		tartomány		
Levkovskii	$\sigma = \begin{cases} 55.3(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-34.8 \frac{N - Z + 1}{A + 1}\right) \\ 49.4(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-35.1 \frac{N - Z}{A}\right) \end{cases}$	19≤A≤40	17	0.468
		40≤A≤188	175	0.399
Eder et al.	$\sigma = \exp\left(1.31 + 0.806A^{1/2} - 10.3 \frac{N - Z}{A^{2/3}}\right)$	19≤A≤188	191	0.29
Bychkov et al.	$\sigma = 46.6(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left\{\sqrt{\frac{A}{140}}\left(-53.3 \frac{N - Z + 1}{A} + 0.622 \frac{Z - 1}{A^{1/3}} - 3.20\right)\right\}$	40≤A≤188	175	0.307
Forrest	$\sigma = 11.23(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-32.73 \frac{N - Z}{A} - 46.57\left(\frac{N - Z}{A}\right)^2 + 0.218A^{1/2}\right)$	40≤A≤188	175	0.254

Kumabe és Fukuda	$\sigma = \begin{cases} 27.9A \exp\left(-39.1\frac{N-Z}{A}\right) \\ 0.58A^2 \exp\left(-42.3\frac{N-Z}{A}\right) \\ 0.94A^2 \exp\left(-47.8\frac{N-Z}{A}\right) \end{cases}$	$40 \leq A \leq 62$	25	0.200
		$63 \leq A \leq 89$	28	0.336
		$90 \leq A \leq 188$	113	0.289
Ait-Tahar	$\sigma = 140.2(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-39.1\frac{N-Z+1}{A}\right)$	$40 \leq A \leq 188$	175	0.309
Kasugai et al.	$\sigma = 1830(N-Z+1) \exp\left(-50.7\frac{N-Z+1}{A}\right)$	$19 \leq A \leq 188$	191	0.280
Korovin et al.	$\sigma = \pi r_0^2 (A^{1/3} + 1)^2$ $\times \left\{ A^{1.1128} \left( 1.1242 \left( \frac{N-Z+1}{A} \right)^2 - 0.73212 \left( \frac{N-Z+1}{A} \right) + 0.11707 \right)^3 \right.$ $\left. + 0.4936 \exp \left( -194.69 \left( \frac{N-Z+1}{A} \right)^2 - 5.3778 \left( \frac{N-Z+1}{A} \right) \right) \right\}$	$11 \leq A \leq 209$	207	0.331

Ait-Tahar	$\sigma = 140.2(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-39.1\frac{N-Z+1}{A}\right)$	$40 \leq A \leq 188$	175	0.309
Kasugai et al.	$\sigma = 1830(N-Z+1) \exp\left(-50.7\frac{N-Z+1}{A}\right)$	$19 \leq A \leq 188$	191	0.280
Korovin et al.	$\sigma = \pi r_0^2 (A^{1/3} + 1)^2$ $\times \left\{ A^{1.1128} \left( 1.1242 \left( \frac{N-Z+1}{A} \right)^2 - 0.73212 \left( \frac{N-Z+1}{A} \right) + 0.11707 \right)^3 \right.$ $\left. + 0.4936 \exp\left( -194.69 \left( \frac{N-Z+1}{A} \right)^2 - 5.3778 \left( \frac{N-Z+1}{A} \right) \right) \right\}$	$11 \leq A \leq 209$	207	0.331
Saját	$23.659(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left(-23.041\left(\left(\frac{N-Z}{A}\right) + \left(\frac{N-Z}{A}\right)^2\right)\right)$	$11 \leq A \leq 209$	207	0.351

\*Az adatok száma



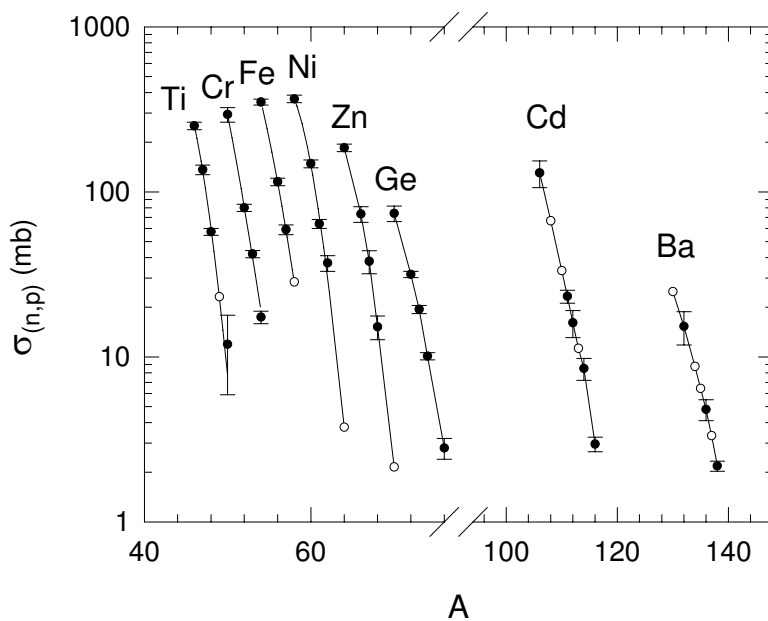
**5.VI. táblázat.** Hosszú felezési idejű target és végmagokra becsült (n,p) hatáskeresztmetszet adatok (14.7±0.2) MeV energiánál

(A  $T_{1/2}$  mennyiséget években adtam meg, ha külön nincs jelölve a mértékegység.)

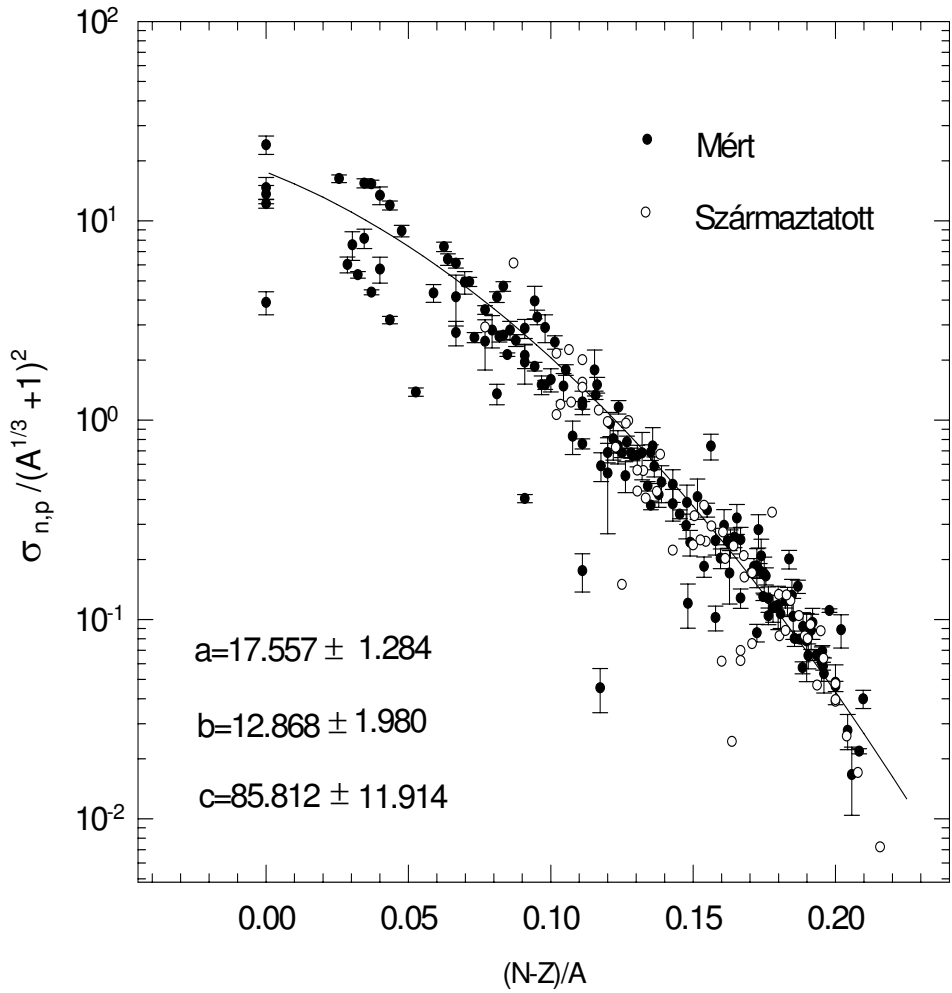
Reakció	$T_{1/2}$ target $T_{1/2}$ /végmag $T_{1/2}$	$\sigma$ (mb)
$^{40}\text{Ca}(n,p)^{40}\text{K}$	$\infty/1.28 \cdot 10^9$	470±50
$^{50}\text{Cr}(n,p)^{50}\text{V}$	$\infty/1.4 \cdot 10^{17}$	294±50
$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$	$\infty/5.27$	148±8
$^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$	$\infty/100.1$	70±13
$^{92}\text{Mo}(n,p)^{92}\text{Nb}$	$\infty/3.47 \cdot 10^7$	186.7
$^{94}\text{Mo}(n,p)^{94}\text{Nb}$	$\infty/2.03 \cdot 10^4$	69.4
$^{108}\text{Cd}(n,p)^{108}\text{Ag}$	$\infty/2.37\text{m} + 418$	66.7
$^{134}\text{Ba}(n,p)^{134}\text{Cs}$	$\infty/2.062$	8.7
$^{135}\text{Ba}(n,p)^{135}\text{Cs}$	$\infty/2.3 \cdot 10^6 + 53\text{m}$	6.4
$^{137}\text{Ba}(n,p)^{137}\text{Cs}$	$\infty/30.07$	3.3
$^{158}\text{Dy}(n,p)^{158}\text{Tb}$	$\infty/180$	10.6±1.2
$^{180}\text{W}(n,p)^{180}\text{Ta}$	$\infty/8.15\text{h} + >1.2 \cdot 10^{15}$	15.2
$^{32}\text{Si}(n,p)^{32}\text{Al}$	172/33ms	16
$^{41}\text{Ca}(n,p)^{41}\text{K}$	$1.03 \cdot 10^5/\infty$	263
$^{55}\text{Fe}(n,p)^{55}\text{Mn}$	2.73/ $\infty$	145
$^{59}\text{Ni}(n,p)^{59}\text{Co}$	$7.6 \cdot 10^4/\infty$	165
$^{60}\text{Fe}(n,p)^{60}\text{Mn}$	$1.5 \cdot 10^6/51\text{s} + 1.77\text{s}$	17
$^{63}\text{Ni}(n,p)^{63}\text{Co}$	100.1/27.4s	34
$^{79}\text{Se}(n,p)^{79}\text{As}$	$\leq 6.5 \cdot 10^4/9.01\text{m}$	17
$^{81}\text{Kr}(n,p)^{81}\text{Br}$	$2.29 \cdot 10^5/\infty$	39

$^{85}\text{Kr}(n,p)^{85}\text{Br}$	10.756/2.90m	12
$^{90}\text{Sr}(n,p)^{90}\text{Rb}$	28.78/158s+258s	11
$^{93}\text{Zr}(n,p)^{93}\text{Y}$	$1.53 \cdot 10^6/10.18\text{h}+0.82\text{s}$	18
$^{93}\text{Mo}(n,p)^{93}\text{Nb}$	$4.0 \cdot 10^3/\infty+16.13\text{y}$	63
$^{107}\text{Pd}(n,p)^{107}\text{Rh}$	$6.5 \cdot 10^6/21.7\text{m}$	20
$^{126}\text{Sn}(n,p)^{126}\text{In}$	$\approx 1 \cdot 10^5/1.6\text{s}$	2.7
$^{133}\text{Ba}(n,p)^{133}\text{Cs}$	10.52/ $\infty$	13
$^{146}\text{Sm}(n,p)^{146}\text{Pm}$	$10.3 \cdot 10^8/5.53$	17
$^{151}\text{Sm}(n,p)^{151}\text{Pm}$	90/28.40h	7.4
$^{154}\text{Dy}(n,p)^{154}\text{Tb}$	$3.0 \cdot 10^6/21.5\text{h}+9.4\text{h}+22.7\text{h}$	22
$^{194}\text{Hg}(n,p)^{194}\text{Au}$	520/38.02h+600ms+420ms	9.5

5.1.ábra. Az  $\sigma_{n,p}$  adatok izotópfüggése

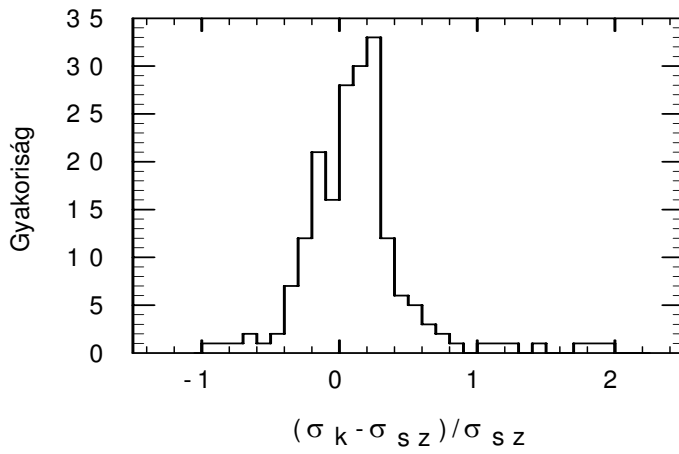


**5.2.ábra.** Az  $\sigma_{n,p}/(A^{1/3}+1)^2$  mennyiség az aszimmetria paraméter  $((N-Z)/A)$  függvényében

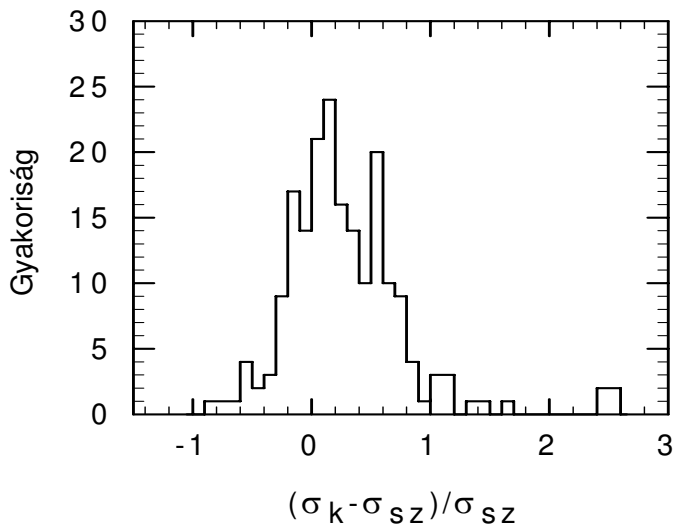


**5.3. ábra.** A  $(\sigma_{\text{kísérleti}} - \sigma_{\text{számított}}) / \sigma_{\text{számított}}$  mennyiség gyakoriságának eloszlása (n,p) reakciók esetén

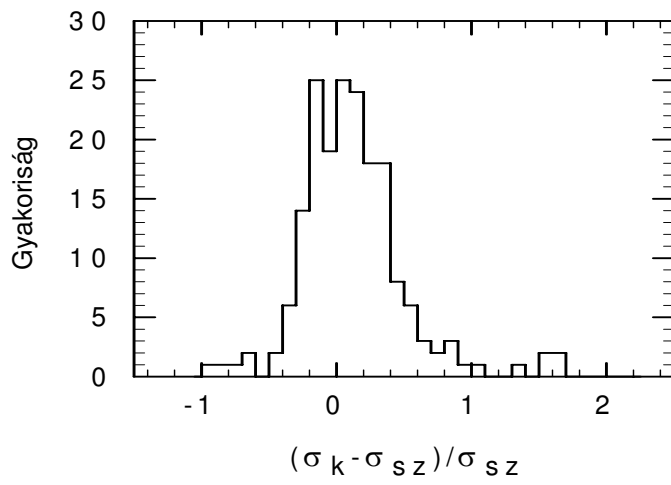
Kasugai et. al.



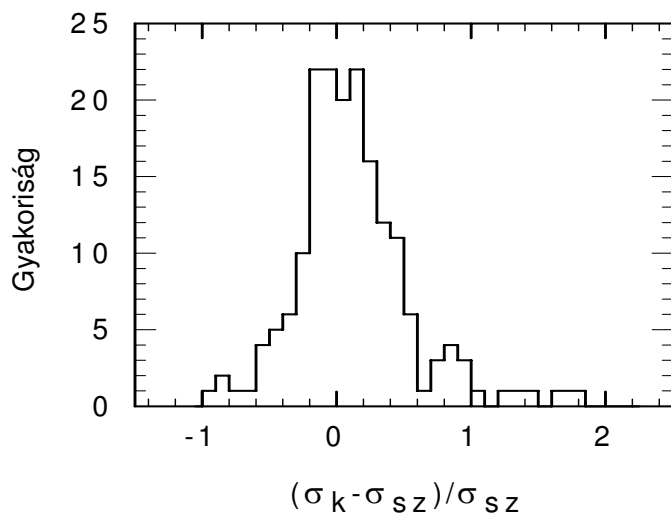
Levkovskii



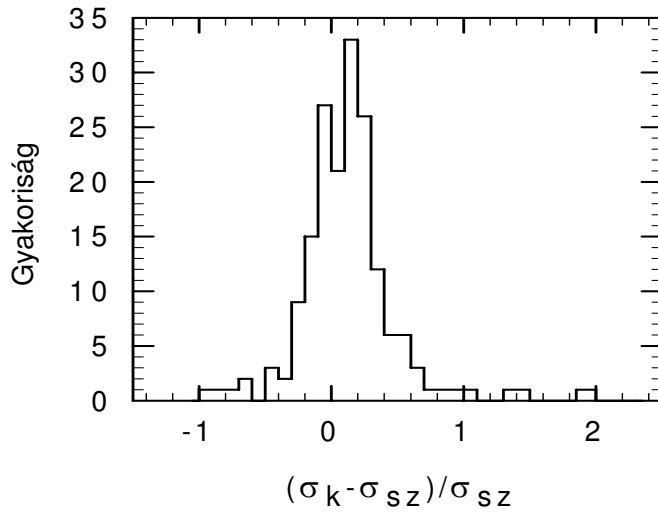
Eder et. al.



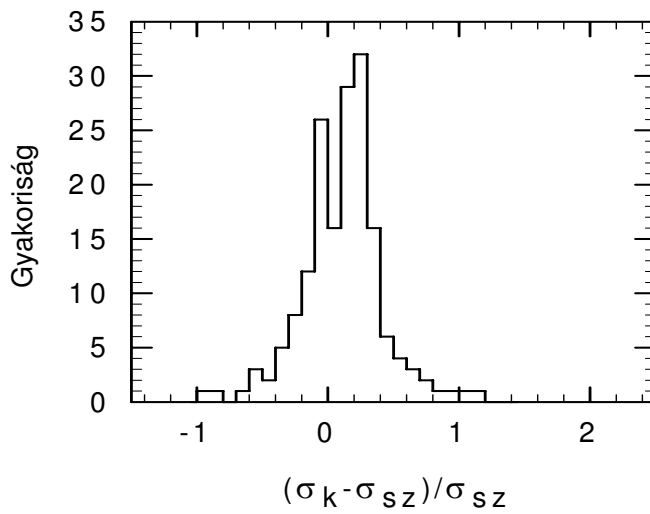
Bychkov et. al.



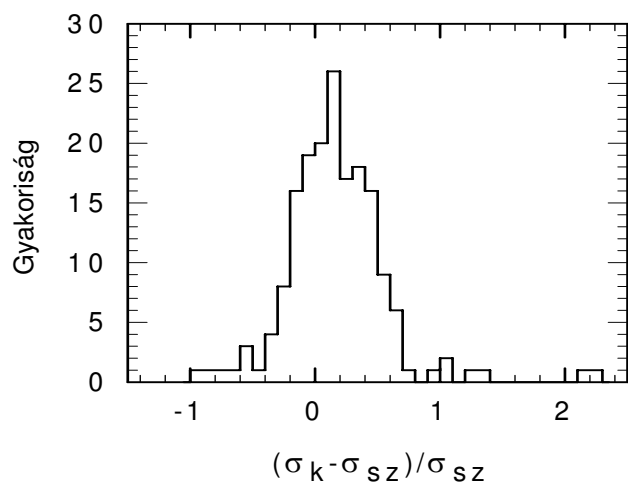
## Forrest



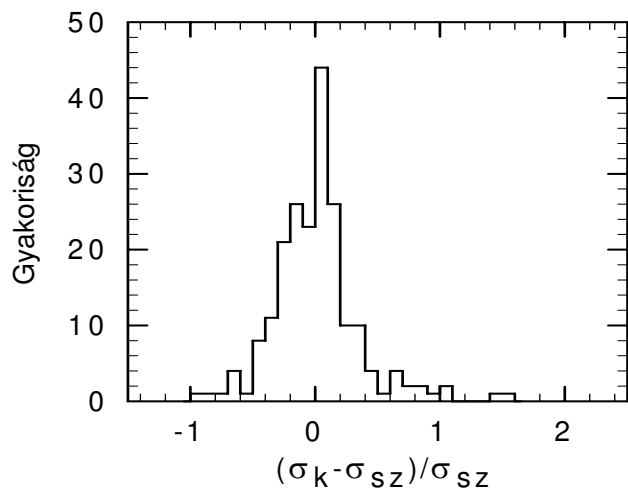
## Kumabe és Fukuda



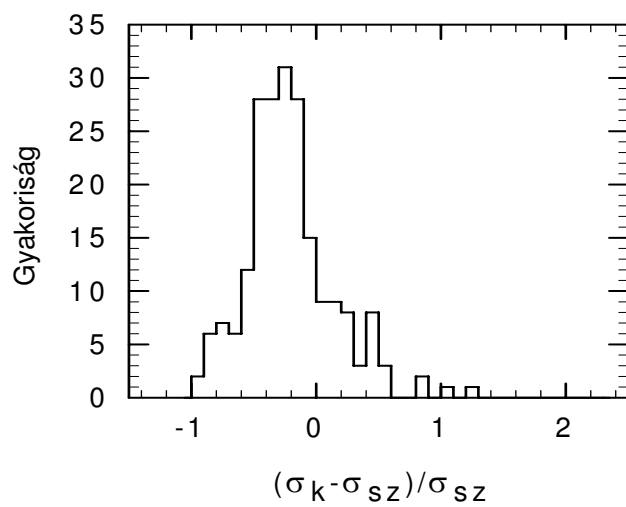
Ait-Tahar



Korovin et. al.



## Saját vizsgálat





## AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

### (Tézisek)

1/ Az ittrium vizsgálata során a következő reakciók gerjesztési függvényét mértem meg aktivációs módszerrel a reakcióküszöbtől 14,7 MeV-ig terjedő neutronenergia tartományban:  $^{89}\text{Y}(n,2n)^{89}\text{Y}$ ;  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$ ;  $^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$ ;  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}}\text{Rb}$ ;  $^{89}\text{Y}(n,n'\gamma)^{89\text{m}}\text{Y}$ . A  $^{89}\text{Sr}$  termék tisztán  $\beta^-$  emitter, az aktivitását a radiokémiai elválasztást követően  $\beta$ -számlálással határoztam meg. A többi esetben  $\gamma$ -spektrometriai vizsálatot alkalmaztam. Az (n, $\alpha$ ) és (n,p) reakciók esetében az eredmények az első összefüggő adatsort adják a reakcióküszöb környéki energiatarományban, az (n,n' $\gamma$ ) reakciót tekintve pedig a 4-13 MeV energiatarományban a gerjesztési függvényben lévő szakadékot íveli át. Az (n,2n) reakció estén az eredmények megerősítik az irodalomban található értékeket.

2/ Az irodalomban fellelhető gerjesztési függvények kiegészítése illetve az ellentmondások feloldása céljából további differenciális hatáskeresztmetszeteket határoztam meg a 7-14,7 MeV-ig terjedő neutronenergia-tartományban a következő reakciók esetén:  $^{90}\text{Zr}(n,\alpha)^{87\text{m}}\text{Sr}$ ,  $^{94}\text{Zr}(n,\alpha)^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89\text{m}+\text{g}}\text{Zr}$ ,  $^{45}\text{Sc}(n,\alpha)^{42}\text{K}$ ,  $^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$ ,  $^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ ,  $^{97}\text{Mo}(n,p)^{97\text{m}+\text{g}}\text{Nb}$ ,  $^{90}\text{Zr}(n,p)^{90\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{91}\text{Zr}(n,p)^{91\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Zr}(n,p)^{92}\text{Y}$ ,  $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60\text{m}+\text{g}}\text{Co}$ .

3/ Mindezen reakciók folytonos neutronspektrumra átlagolt hatáskeresztmetszetét is megmértem, és ezeken kívül még a  $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ ,  $^{68}\text{Zn}(n,\alpha)^{65}\text{Ni}$ ,  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ,  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58\text{m}+\text{g}}\text{Co}$ ,  $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ ,  $^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$ ,  $^{94}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$ ,  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ ,  $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46\text{m}+\text{g}}\text{Sc}$ ,  $^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$ ,  $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ ,  $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$  reakciókra végeztem el az integrális adatok meghatározását. A vastag berillium target bombázása ennél a mérésorozatnál 9,72 MeV energiájú deuteron nyalábbal történt.

4/ Az integrális mérési adatokat az ENDF/B-VI, IRDF 90, JENDL-3, BROND, JEF-2, CENDL-2, ADL-3 adatbankokból és a SINCROS-II. rendszerből nyert adatok alapján számított integrális értékekkel vetettem össze. A kétféle módon kapott eredmények kielégítő egyezése esetén az illető adatbank ajánlásait a továbbiakban standard dozimetriai adatoknak tekinthetjük.

5/ Az integrális ellenőrzéshez felhasznált neutron-spektrumokat az „unfolding” módszerrel kombinált sokfóliás aktivációs technikával határoztam meg. A Be(d,n) forrás terének tanulmányozása során az így nyert spektrumot összehasonlítottam a neutronspektrométerrel mérttel.

6/ A 14 MeV neutronenergia környékén fellelhető (n,p) hatáskeresztmetszet adatok szisztematikájának tanulmányozása során összegyűjtöttem a Debrecenben megmért hatáskeresztmetszet értékeket, majd ezeket kiegészítettem a legfrissebb irodalmi adatokkal, hogy elkészíthessem az ajánlott értékek összefüggő adatsorát. 61 ismeretlen (n,p) adatot származtattam, amelyek mérése lehetetlen vagy nehézkes lett volna a kedvezőtlen bomlási sajátságok miatt. 54 elem esetén meghatároztam a totális (n,p) hatáskeresztmetszetet a  $\sigma_{n,p}$  értékek izotópgyakorisággal súlyozott átlagaként, ezeket összevettem a proton detektáláson alapuló ún. direkt mérések eredményével.

A javasolt új adatsor a Levkovskij által megadott empirikus kifejezéssel illeszthető meg. Ha az exponenciális tényező szorzójaként egy további kifejezéssel bővítjük az egyenletet, az illesztés javítható. Ily módon az  $\sigma_{n,p}$  adatok szisztematikus tanulmányozása lehetővé tette, hogy hosszú felezési idejű target- illetve termékmagok esetére (n,p) hatáskeresztmetszeteket becsüljek meg.

## 7. Summary

**Extation functions** were measured for  $^{89}\text{Y}(n,2n)^{88}\text{Y}$ ,  $^{89}\text{Y}(n,p)^{89}\text{Sr}$ ,  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86}\text{Rb}$ ,  $^{89}\text{Y}(n,n',\gamma)^{89\text{m}}\text{Y}$  and  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}}\text{Rb}$  reactions from their respective thresholds up to 14.7 MeV using the activation technique. Quasi-monoenergetic neutrons in the energy range between 7.8 and 13.3 MeV were produced via the  $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$  reaction on a  $\text{D}_2$  gas target at the Jülich compact cyclotron (CV 28). For the production of monoenergetic neutrons in the range from 13.8 to 14.7 MeV the D-T neutron generator of Debrecen was used. The activities of the  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{89\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{86}\text{Rb}$  and  $^{86\text{m}}\text{Rb}$  reaction products high-resolution  $\gamma$ -ray spectrometry was applied. The  $^{86}\text{Rb}$  product was separated radiochemically and its activity was measured also by low-level  $\beta^-$  counter; the results obtained using the two counting methods were generally in good agreement. The product  $^{89}\text{Sr}$  is a pure  $\beta^-$  emitter: its activity was exclusively assayed via radiochemical separation and  $\beta^-$  counting. Our results agree with the literature values on the (n,2n) reaction and provide the first consistent set of data on the (n,p) and (n, $\alpha$ ) reactions near their reaction thresholds. In the case of the  $^{89}\text{Y}(n,n',\gamma)^{89\text{m}}\text{Y}$  reaction our experimental data in the energy range of 5 to 13 MeV fill the existing gap. For the  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}}\text{Rb}^{\text{m}}$  process no data have hitherto been reported except for some 14 MeV values.

Concerning the  $^{89}\text{Y}(n,\alpha)^{86\text{m}+\text{g}}\text{Rb}$  process the isomeric cross section ratios  $[\sigma_{\text{m}}/(\sigma_{\text{m}}+\sigma_{\text{g}})]$  were deduced for each neutron energy point investigated.. The data were compared with the results of nuclear model calculations and a good agreement was found.

Precise **cross sections** were measured for the  $^{90}\text{Zr}(n,\alpha)^{87\text{m}}\text{Sr}$ ,  $^{94}\text{Zr}(n,\alpha)^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89\text{m}+\text{g}}\text{Zr}$ ,  $^{45}\text{Sc}(n,\alpha)^{42}\text{K}$ ,  $^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$ ,  $^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Mo}(n,p)^{92\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{96}\text{Mo}(n,p)^{96}\text{Nb}$ ,  $^{97}\text{Mo}(n,p)^{97\text{m}+\text{g}}\text{Nb}$ ,  $^{90}\text{Zr}(n,p)^{90\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{91}\text{Zr}(n,p)^{91\text{m}}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Zr}(n,p)^{92}\text{Y}$ ,  $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60\text{m}+\text{g}}\text{Co}$  reactions in

the 7 MeV and 14.7 MeV neutron energy range using the activation technique. Neutrons were produced by the variable energy cyclotron of ATOMKI (Debrecen) using D<sub>2</sub> gas target. Excitation functions were completed this way with a number of new differential data. Special attention was paid to the contribution of low energy breakup neutrons to the total activity. Therefore, the spectral shape of neutrons produced in  $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$  reaction has been determined by the activation unfolding method. A systematic study of the available literature has shown that the trends in the energy dependence of the cross sections measured by different authors agree well in most cases. Experimental data are discrepant for the  $^{91}\text{Zr}(n,p)^{91m}\text{Y}$ ,  $^{92}\text{Zr}(n,p)^{92}\text{Y}$  and  $^{94}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$  reactions in the 9-11 MeV, 5.5-6.5 MeV and the 14 MeV regions respectively. The measured, calculated and evaluated excitation functions deviate significantly for the reactions investigated in this work.

A way for validation of the measured and evaluated differential data is the comparison of the measured and calculated spectrum averaged cross sections using a well known benchmark neutron field. The nuclear reaction models can also be checked in this manner.

**Spectrum averaged (n, $\alpha$ ) and (n,p) cross-sections** were measured for the  $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$ ,  $^{68}\text{Zn}(n,\alpha)^{65}\text{Ni}$ ,  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ,  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$ ,  $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ ,  $^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$ ,  $^{94}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$ ,  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ ,  $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46m+g}\text{Sc}$ ,  $^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$ ,  $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ ,  $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$  reactions in addition to those listed in the previous paragraphs using thick target Be(d,n) neutron field at  $E_d = 9.72$  MeV. Results were compared with the calculated spectrum averaged cross sections using the ENDF-B/VI, IRDF90, JENDL-3, BROND, JEF-2, CENDL-2, ADL-3 data files and the SINCROS-II system. The best fits to the experimental data are determined. These recommended data libraries can be considered as standard dosimetry files, since the agreement between the measured and calculated cross sections are satisfactory for most of the reactions studied in this work. Evidently, almost all evaluations show good agreement with each other and the experimental data for the well known dosimetry reactions, e.g. in the case of  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ,  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$  and  $^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$ . New evaluations and measurements are required for the following reactions:  $^{90}\text{Zr}(n,\alpha)^{87m}\text{Sr}$ ,  $^{94}\text{Zr}(n,\alpha)^{91}\text{Sr}$ ,  $^{92}\text{Mo}(n,\alpha)^{89m+g}\text{Zr}$  and  $^{94}\text{Zr}(n,p)^{94}\text{Y}$ .

**Be(d,n) neutron sources** are very often used for validation of differential data by comparison of measured and calculated spectrum averaged cross sections. The spectrum is strongly forward peaked and hence the precise knowledge of the actual thick target Be(d,n) spectrum at different D<sup>+</sup> beam energies is indispensable.

The multiple foil activation technique combined with some unfolding methods is widely used for the determination of neutron flux density spectra around thin samples or inside bulk media. However, the Pulse Height Response Spectrometer (PHRS) allows the possibility to check and control the spectrum continuously during the irradiation. Therefore, it seemed to us worthwhile to compare the spectra obtained by the PHRS system and the multiple foil unfolding method. The code SULSA was used to determine the unknown  $\phi(E)$  function by the solution of the following equation

$$a_i = \int \phi(E)\sigma_i(E)dE \quad /7.1/$$

where  $a_i$  and  $\sigma_i$  are the reaction rate and the excitation function of the  $i$ -th reaction, respectively, while  $i=1,\dots,n$  is the number of the measured reaction. It is important to mention that the SULSA code does not need an input spectrum.

A comparison of the neutron spectra obtained by the PHRS system and the multiple foil activation method shows that the unfolded spectrum obtained by the activation technique contains significant contributions of low energy neutrons since the solid angle for the foil stack was larger than for the scintillation detector, furthermore, the threshold energy of the PHRS system is higher ( $\approx 1.5$  MeV) than for the activation reactions. The high energy tail also shows deviation, which can be attributed to the limited number of activation reactions and the low statistics of the PHRS spectrum.

Recently, on the basis of precise cross section measurements a number of investigations were devoted to **improve the systematics** based

on the isotopic and asymmetry parameter dependences. The reliable theoretical and empirical formulae are indispensable to estimate cross sections if experimental data are not available. In this work the systematic behavior of the (n,p) cross sections was examined.

The isotopic dependence of the measured (n,p) cross sections can be well approximated by the following expression

$$\sigma_{n,p}(A)_{Z=\text{const}} = ae^{-bS-cS^2}, \quad /7.2/$$

where a, b, and c are fitting parameters.

Using Eq. /7.2/ 61 unknown  $\sigma_{n,p}$  data were deduced for nuclei having unfavourable decay properties.

Total (n,p) cross sections were determined for 54 elements by averaging the  $\sigma_{n,p}$  values over isotopic abundances. The analyses of the available hydrogen production cross sections and the recommended  $\sigma_{n,p}$  data listed in this work indicate that the (n,np) and (n,d) reactions are significant even for medium and heavy nuclei.

The fit of the empirical expression given by Levkovskii to the recommended data proved that the gross trend in the (n,p) cross sections is determined by the asymmetry parameter S. A new formula (Eq. 7.3), with an additional term in the exponential, gives a substantial improvement in fitting the data

$$\sigma_{n,p} = a(A^{1/3} + 1)^2 e^{-b(S + S^2)} = aB(A)e^{-b(S + S^2)}. \quad /7.3/$$

The values of a and b parameters are  $23.659 \pm 1.128$  and  $23.041 \pm 0.507$ , respectively. The fits of the formulae to the data were based on the weighted least-squares method. The deviations from the trend are significant for magic Z numbers and deformed nuclei.

The systematic studies of the  $\sigma_{n,p}$  data rendered possible to estimate some (n,p) cross sections both for long-lived target and residual radionuclides.



## 8. IRODALOMJEGYZÉK

- 1.1 Csikai Gyula: A gyorsneutron-adatok és a fúziós reaktorok, Akadémiai Kiadó 1987.
  
- 2.1 Bacsó József, Daróczy Sándor, ATOMKI Közlemények 5 17 (1963).
- 2.2 Nagy Sándor, Egyetemi doktori értekezés, KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék, Debrecen, 1970.
- 2.3 Laboratory Manual, IAEA Training Course on Utilization of Neutron Generators, Debrecen, 1982.
- 2.4 Raics Péter, Kandidátusi értekezés, KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék, Debrecen, 1990.
- 2.5 I. G. Birn, Dissertation, Technische Universität zu Drezden (1993).
  
- 3.1 CINDA-A and CINDA 95: The Index to Literature and Computer Files on Microscopic Neutron Data, IAEA, Vienna, 1990 and 1995.
- 3.2 McLane, V., Dunford, C.L., Rose, P.F.: Neutron Cross Sections, Vol. 2, Academic Press, Inc., New York, 1988.
- 3.3 Lederer, C.M., Shirley, V.S.: Table of Radioactive Isotopes, 7th Edition, John Wiley & Sons, New York, 1978.
- 3.4 Browne, E., Firestone, R.B.: Table of Radioactive Isotopes, (Shirley, V.S. Editor), John Wiley & Sons, New York, 1986.
- 3.5 Smith, A.B., Smith, D.L., Rousset, P., Lawson, R.D., Howerton, R.J.: Evaluated Neutronic Data File for Yttrium, Report ANL/NDM-94, 1986.



- 3.6 Wagner, M., Winkler, G., Vonach, H., Buczkó, Cs. M., Csikai, J.: Annals Nucl. Energy 16, 623 (1989).
- 3.7 Csikai, J., Nagy, S.: Nucl. Phys. A91. 222 (1967).
- 3.8 Levkovskii, V., Kovel'skaya, G.E., Vinit'skaya, G.P., Stepanov, V.M., Sokol'skii, V.V.: Sov. J. Nucl. Phys. 8., 4 (1969).
- 3.9 Bayhurst, B.P., Prestwood, P.J.: J. Inorg. Nucl. Chem. 23, 173 (1961).
- 3.10 Tewes, H.A., Caretto, A.A., Miller, A.E., Nethaway, D.R.: Report UCRL-6028-T, Abstract, 1960.
- 3.11 Paul, E.B., Clarke, R.L.: Can. J. Phys. 31, 267 (1953).
- 3.12 Strohal, P., Cindro, N., Eman, B.: Nucl. Phys. 30, 49 (1962).
- 3.13 Kayashima, et al.: Report NEANDC (J)-61U, 94 (1979).
- 3.14 Kneff, D.W., Oliver, B.M., Farrar IV, H. Greenwood, L.R.: Nucl. Sci. Eng. 92, 291 (1986).
- 3.15 Haight, R.C., Grimes, S.M., Johnson, R.G., Barschall. H.H.: Phys. Rev. C23, 700 (1981).
- 3.16 Qaim, S.M., Wölfe, R., Rahman, M. M., Ollig, H.: Nucl. Sci. Eng. 88, 143 (1984).
- 3.17 Grallert, Á., Csikai, J., Qaim, S.M., Knieper, J.: Nucl. Instr. Methods A334, 154 (1993).
- 3.18 Birn, I.: "NEUT - Ein Programm zur Berechnung von Neutronenspektren erzeugt durch die  $D(d,n)^3\text{He}$  - reaction in einem Gastarget am Zyklotron", Interner Bericht KFA-IB-1/92, Forschungszentrum Jülich GmbH, 1992.
- 3.19 Csikai, J.: Handbook of Fast Neutron Generators, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida 1987, Vol. I.
- 3.20 International Radiation Dosimetry File (IRDF), IAEA, Vienna, 1990.

- 3.21 Korkisch, J.: Handbook for Ion Exchange Resins: Their application to Inorganic Analytical Chemistry, Vol. V., CRC Press. Inc., Boca Raton, Florida, 1989.
- 3.22 Lux, H.: Praktikum der quantitativen anorganischen Analyse 7, J. F. Bergmann Verlag, München 1979.
- 3.23 Qaim, S.M., Cserpák, F., Csikai, J.: Appl. Radiat. Isot., 47, 569 (1996).
- 3.24 Cabral, S., Börker, G., Klein, H., Mannhart, W.: Nucl. Sci. Eng. 106, 308 (1990).
- 3.25 Uhl, M., Strohmaier, B.: Computer Code for Particle Induced Activation Cross Section and Related Quantities, Institut für Radiumforschung und Kernphysik Report 76/01, 1976.
- 3.26 Sudár, S., Qaim, S.M.: Phys. Rev. C50, 2408 (1994).
- 3.27 Bersillon, O.: SCAT2: Un programme de modele optique spherique, Centre d'Etudes de Bruyères-le-Chatel Report, CEA-N-2227 (1981).
- 3.28 Perey, F. G.: Phys. Rev. 131, 745 (1962).
- 3.29 McFadden, L., Satchler, G. R.: Nucl. Phys. 84, 177 (1966).
- 3.30 Madland, D. G., Young, P. G.: in Proc. Int. Conf. On Neutron Physics and Nuclear Data, Harwell, september 1978, OECD-Nuclear Energy Agency, Paris 1978, p. 349.
- 3.31 Avrigeanu, M., Harangozo, A., Avrigeanu, V.: Surface Effects in FKK Analysis of (n,n') and (n,p) Reactions at 7 to 26 MeV, Reprint NP-85-1995, Institute of Physics and Nuclear Engineering, Bucharest, Romania.
- 3.32 Raics, P., Pászti, F., Daróczy, S., Nagy, S.: ATOMKI Közl. 23, 45 (1981).
- 3.33 Ghorai, S. K., Hudson, C. G., Alford, W. L.: Nucl. Phys. A266, 53 (1976).

- 3.34 Bormann, M., Feddersen, H.-K., Hölischer H.-H., Scobel W., Wagener, H.: *Z. Physik A277*, 203 (1976).
- 3.35 Abboud, A., Decowski, P., Grochulski, W., Marcinkowski, A., Siwek, K., wilhelmi, Z.: *Acta Phys. Pol. B2*, 527 (1971).
- 3.36 Huang, J.-Z., Hanlin, Li, J.-Z., Fan, P.-G.: *Chinese J. Nucl. Phys.* 2, 213 (1980).
- 3.37 Bayhurst, B. P., Gilmore, J. S., Prestwood, R. J., Wilhelmi, J. B., Jarmie, N., Erkkila, B. H., Hardekopf, R. A.: *Phys. Rev. C12*, 451 (1975).
- 3.38 Veaser, L. R., Arthur, E. D., Young, P. G.: *Phys. Rev. C16*, 1792 (1977).
- 3.39 Frehaut, J., Bertin, A., Bois, R., Jary J.: in *Proc. Symposium on Neutron Cross Sections from 10 to 50 MeV*, Brookhaven, May 1980 (Bhat, M. R., Pearlstein, S., Editors) Report BNL;NCS;51245, Brookhaven Upton, New York, USA 1980, p. 399.
- 3.40 Rahman, M. M., Qaim, S.M.: *Nucl. Phys. A435*, 43 (1985).
- 3.41 Qaim, S.M., Wölfe, R., Strohmaier, B.: *Phys. Rev. C40*, 1993 (1989).
- 3.42 Mannan, A., Qaim, S.M.: *Phys. Rev. C38*, 630 (1988).
- 3.43 Ibn Majah, M., Qaim, S.M.: *Nucl. Sci. Eng.* 104, 271 (1990).
- 3.44 Qaim, S.M., Ibn Majah, M., Wölfe, R., Strohmaier, B.: *Phys. Rev. C42*, 363 (1990).
- 3.45 F. Cserpák, S. Sudár, J. Csikai, and S. M. Qaim, *Phys. Rev. C* 49,1525(1994).
- 3.46 S. Sudár, S. M. Qaim, *Phys. Rev. C* 50,1525(1994).
- 3.47 B. Strohmaier, M. Fassbender and S. M. Qaim, *Phys. Rev. C* 56,2654(1997).

- 3.48 S. M. Qaim, in Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Gatlinburg, 1994, edited by J. K. Dickens (American Nuclear Society, La Grange Park, IL.(1994)p186.
- 3.49 S. M. Qaim, A. Mustaq and M. Uhl, Phys. Rev. C38,645(1988).
- 3.50 S. Sudar, S. M. Qaim, Phys. Rev. C53,2885(1996).
- 3.51 ENDF/B6, NNCSC, Brookhaven National Laboratory, USA, (October 1991).
- 3.52 JENDL-2.2.: T. Nakagawa, S. Shibata, S. Chiba, T. Fukahori, Y. Nakajima, Y. Kikuchi, T. Kawano, Y. Kanda, H. Matsunobu, M. Kawai, A. Zukeran, T. Watanabe, S. Igarasi, K. Kosako and T. Asami, Nucl. Sci. Technol. 32(12), 1259, (1995).
- 3.53 G. Broadhead, B. E. Shanks and H. H. Heady, Phys. Rev. 139, 1525(1965).
- 3.54 Petó, P. Bornemissza-Pauspertl, J. Károlyi, Acta Phys. Hungarica 25, 91(1968).
- 3.55 A. Weaver, J. D. Anderson, J. D. Barschall and J. C. Davis, Nucl. Sci. Eng. 52(1973) 35.
- 3.56 A. Lone, C. G. Bigham, J. S. Fraser, H. R. Schneider, T. K. Alexander, A. J. Ferguson and A. B. McDonald, Nucl. Instr. and Meth. 143(1977) 331.
- 3.57 A. Lone, A. J. Ferguson and B. C. Robertson, Nucl. Instr. and Meth. 189(1981) 515.
- 3.58 Dietze, H. J. Brede, D. Schlegel-Bickmann, in. Proc. Int. Conf. Advances in Dosimetry for Fast Neutrons and Heavy Charged Particles for Therapy Applications (IAEA, Vienna, 1984) p. 23.
- 3.59 Crametz, H.-H. Knitter and D. L. Smith, in: Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology (Editor K. H. Böckhoff) (Antwerp, 1982), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands, p. 902.

- 3.60 Fl. Tancu, M. T. Magda, S. Dima, M. Macovei, E. Ivanov, R. Dumitrescu and C. Stan-Sion, *Revue Roumaine de Physique*, 28(1983) 857.
- 3.61 L. Smith, J. W. Meadows and P. T. Guenther, *Nucl. Instr. and Meth. A* 241(1985) 507.
- 3.62 M. Baumann, G. Domongala, H. Freiesleben, H. J. Paul, S. Puhllvers and H. Sohlbach, *Nucl. Instr. and Meth. A*247 (1986) 359.
- 3.63 J. Brede, G. Dietze, K. Kudo, U. J. Schrewe, F. Tancu and C. Wen, *Nucl. Instr. and Meth. A*274 (1989) 332.
- 3.64 M. Grimes, T. N. Massey, C. E. Brient, S. I. Al-Quraishi, D. K. Jacobs, R. T. Wheeler, J. E. O'Donnel, J. E. Oldendick, W. B. Howard, J. Yanch, D. L. Smith and B. J. Miklich, Neutrons produced by stopping targets of  $^9\text{Be}$  from proton and deuteron bombardment, presented in the Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, May 19-24, 1997, Trieste, Italy, Book of Abstracts, p. 902.
- 3.65 S. Sudár, A Solution for the Neutron Spectrum Unfolding Problem Without Using Input Spectrum INDC(HUN)-026/L, IAEA, Vienna, Austria, 1989.
- 3.66 K. Wölfle, S. Sudár and S. M. Qaim, *Nucl. Sci. Eng* 91(1985) 162.
- 3.67 S. M. Qaim, in Proc. Advisory Group Meeting on Properties of Neutron Sources, Leningrad, USSR, June 1986, IAEA-TECDOC-410 (1987) p.90.
- 3.68 K. G. Broadhead and D. E. Shanks, *Int. Journal of Applied Radiation and Isotopes*,18, 279, (1967).
- 3.69 A. A. Filatenkov, S. V. Chuvaev, V. N. Aksenov and V. A. Jakovlev, Systematic Measurement of Activation Cross Sections at Neutron Energies from 13.4-14.9 MeV, INDC(CCP)-402 (1997).
- 3.70 E. T. Bramlitt and R. W. Fink, *Phys. Rev.*,131, 2649, (1963).
- 4.1 R.C. Ward, I. C. Gomes and D. L. Smith, A survey of selected neutron-activation reactions with short-lived products of importance

- to fusion reactor technology, INDC(USA)-106, (IAEA, Vienna, Austria) (1994).
- 4.2 N. B. Perez, E. T. Cheng, A. B. Pashchenko and H. K. Vonah, Present status of activation cross section data for production of long-lived radionuclides probably most important for waste disposal, INDC(NDS)-302, (IAEA, Vienna, Austria) (1994).
  - 4.3 Á. Grallert, J. Csikai, S. M. Qaim, Improved gas-cell D-D neutron sources, Nucl. Instr. And Meth. A337 (1994) 615-618.
  - 4.4 J. Csikai, Use of small accelerator and isotope neutron sources in materials research, in: Int. Conf. on „Neutrons and their Applications”, Vol. 2339, ed. George Vourvopoulos, Themis Paradellis (SPIE, USA, 1994) pp. 318-334.
  - 4.5 J. Csikai, Á. Grallert, L. Oláh and S. M. Qaim, Characteristics of Low Energy Accelerator Neutron Sources, in: Int. Conf. on Nuclear data for Science and Technology, Gatlinburg, Vol. I, ed. J. K. Dickens (ANS, USA, 1994) pp. 78-80.
  - 4.6 Á. Grallert, J. Csikai, S. M. Qaim and J. Knieper, Recommended target materials for D-D neutron sources, Nucl. Instr. And Meth. A334 (1993) 154-159.
  - 4.7 J. Csikai, Handbook of Fast Neutron Generators, CRC Press. Inc., Boca Raton, Florida, 1987, Vols. I and II.
  - 4.8 S. Sudár, A solution for the Neutron Spectrum Unfolding Problem Without Using Input Spectrum, INDC(HUN)-026/L, (IAEA, Vienna, Austria) (1989).
  - 4.9 E. Browne and R. B. Firestone, Table of Radioactive Isotopes, (ed. V. S. Shirley), John Wiley and Sons, New York, 1978.
  - 4.10 Cs. M. Buczkó, J. Csikai, S. Sudár, Á. Grallert, S. A. Jonah, B. W. Jimba, T. Chimoye, M. Wagner, Excitation functions and isotopic cross section of the  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$  reactions from 2 to 15 MeV, Phys. Rev. C 52(4) (1995) pp. 1940-1946.

- 4.11 Á. Grallert, J. Csikai, Cs. M. Buczkó and I. Shaddad, Investigations on the Systematics in (n, $\alpha$ ) Cross Sections at 14.6 MeV, INDC(NDS)-286, IAEA, Vienna (November 1993) pp.131-139.
- 4.12 V. McLane, Cross Section Information Storage and Retrieval System, NRDSRS Users Manual, BNL-NCS-41300 (1988).
- 4.13 P.Raics, S.Nagy, S. Szegedi, Cross Section Measurements of Neutron Induced Reactions on the Zirconium Isotopes in the Energy Range of 5.4-12.3 MeV, Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Jülich, ed. S.M. Qaim (Springer-Verlag, Germany 1991) pp.660-662.
- 4.14 S.M. Qaim, M. Ibn Majah and R.Wölfe, Excitation functions and isomeric cross section ratios for the  $^{90}\text{Zr}(n,p)^{90}\text{Y}^{\text{m,g}}$  and  $^{91}\text{Zr}(n,p)^{91}\text{Y}^{\text{m,g}}$  processes, Physical Review C, Vol. 42, N.1, (1990), pp 363-367.
- 4.15 A. Marchinkowski, U. Garuska, H. M. Hoang, D. Kielan and B. Zwięglinski, Cross Sections on the (n,p) Reaction on Zirconium Isotopes, Nuclear Physics, A 510 (1990) pp.93-105.
- 4.16 H. Liskien, R. Wolfle, R. Widera and S.M. Qaim, Excitation Functions of (n,p) and (n,  $\alpha$ ) Reactions on Molibdenum Isotopes, Appl. Radiat. Isot. 41, No. 1, (1990) pp. 83-90.
- 4.17 M.M. Rahman and S.M. Qaim, Excitation Functions of Some Neutron Threshold Reactions on Isotopes of Molibdenum, Nuclear Physics A 435 (1985), pp. 43-53.
- 4.18 A. Marchinkowski, K. Stankiewicz, U. Garuska and M. Herman, Cross Sections of Fast Neutron Induced Reactions of Molibdenum Isotopes, Zeitschrift für Physik A, Atomic Nuclei 323, (1986), pp. 91-96.
- 4.19 Y. Ikeda, C. Konno, K. Oishi, T. Nakamura, H. Miyade, K. Kawade, H. Yamamoto and T. Katoh, Activation Cross Section Measurements for Fusion Reactor Structural Materials at Neutron

- Energy from 13.3 to 15.0 MeV Using FNS Facility, JAERY 1312, Tokai-mura (March, 1988).
- 4.20 N. Yamamuro, A Nuclear Cross Section Calculation System with Simplified Input-Format VERSION-II (SINCROS-II), JAERI-M 90-006, Japan Atomic Energy Research Institute (1990).
- 4.21 N. Yamamuro, Cross-Section Calculations for Neutron-Induced Reactions up to 50 MeV, Nucl. Sci. and Eng., 122(1996) 374-383.
- 4.22 N. Yamamuro, Calculation of Activation Cross Sections for Molybdenum Isotopes, Nucl. Sci. and Eng., 109(1991) 128-141.
- 4.23 N. Yamamuro, Activation Cross-Section Calculations on the Production of Long-Lived Radionuclides, Nucl. Sci. and Eng., 118(1994) 249-259.
- 5.1 R.C.Haight, S.M.Grimes, R.G.Johson and H.H.Barschall, Charged-Particle Emission in Reactions of 15 MeV Neutrons with  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  and  $^{92,94,95,96}\text{Mo}$ , Phys. Rev. C23(1981)700-707.
- 5.2 S.M.Grimes, R.C.Haight, K.R.Alvar, H.H.Barschall and R.R.Borchers, Charged-Particle Emission in Reactions of 15 MeV Neutrons with Isotopes of Chromium, Iron, Nickel and Copper, Phys. Rev. C19(1979)2127-2137.
- 5.3 R.Fischer, G.Traxler, H.Vonach, and M.Uhl, Investigation of Charged Particles from (n,p) and (n, $\alpha$ ) Reactions, Rad. Effects, 96(1986)309-312.
- 5.4 S.M.Grimes, R.C.Haight and J.D.Anderson, Charged-Particle-Producing Reactions of 15 MeV Neutrons on  $^{51}\text{V}$  and  $^{93}\text{Nb}$ , Phys.Rev.C17 (1978)508-515.
- 5.5 S.M.Grimes, R.C. Haight and J.D.Anderson, Measurement of Sub-Coulomb-Barrier Charged Particles Emitted from Aluminium



- and Titanium Bombarded by 15 MeV Neutrons, Nucl. Sci. Eng.62(1977)187-194.
- 5.6 L.R.Greenwood, D.G.Doran and H.L.Heinisch, Production of  $^{91}\text{Nb}$ ,  $^{94}\text{Nb}$  and  $^{95}\text{Nb}$  from Mo by 14.5-14.8 MeV Neutrons, Phys.Rev.35(1987)76-80.
- 5.7 C.Tsabarlis, E.Wattecamps and G.Rollin, Double Differential (n,xp) and (n,x $\alpha$ ) Cross Section Measurements of  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{58}\text{Ni}$  and  $^{63}\text{Cu}$  in the Neutron Energy Range from 2.0 to 15.5 MeV, *ibid.* pp.282-284.
- 5.8 CINDA-Series: The Index to Literature and Computer Files on Microscopic Neutron Data, IAEA, Vienna, 1990 and 1995.
- 5.9 V.McLane, C.L.Dunford and P.F.Rose, Neutron Cross Sections, Vol.2, Academic Press, Inc., New York, 1988.
- 5.10 J.Csikai, Handbook of Fast Neutron Generators, CRC Press.Inc., Boca Raton, Florida, 1987, Vols.I and II.
- 5.11 R.A.Forrest, Systematics of Neutron-Induced Threshold Reactions with Charged Products at about 14.5 MeV, AERE-R 12419, Harwell Laboratory, (December,1986).
- 5.12** J.Kopecky, Experimental Data Base Compiled for Renormalizations and Validation of EAF-4.1 Data, EAF-Doc-6,7,8, ECN Petten, (August 1994, September 1994, January1996).
- 5.13** R. C. Haight, S. M. Grimes, and J. D. Anderson, Hydrogen and Helium Production Cross Sections for 15 MeV Neutrons on Types 316 and 304 Stainless Steel, Nuclear Science and Engineering: 63, 200-204, 1977.
- 5.14** B. A. Magurno, Dosimetry, Gas Production, and Activation Cross-Section Data, Progress in Nuclear Energy, Vol 13, No 2/3, pp. 259-285, 1984.

- 5.15 A. D. Majdeddin, V. Semkova, R. Dóczy, Cs. M. Buczkó and J Csikai, Investigations on  $(n,\alpha)$  cross sections in the 14 MeV region, INDC(HUN)-032, IAEA, Vienna, 1997.
- 5.16 V M.Bychkov, V.N.Manokhin, A.B.Pashchenko and V.I.Plyashin, Cross Sections for the  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$  and  $(n,2n)$  Threshold Reactions, INDC(CCP)-146, IAEA, Vienna, 1980.
- 5.17 A.B.Pashchenko, Reaction Cross-Sections Induced by 14.5 MeV and by Cf-252 and U-235 Fission Spectrum Neutrons, INDC(CCP)-323, IAEA, Vienna, 1991.
- 5.18 S.M.Qaim, 14 MeV Neutron Activation Cross-Sections, in Handbook of Spectroscopy, Vol.III, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1981, p.141.
- 5.19 C.Konno, Y.Ikeda, K.Oishi, K.Kawade, H.Yamamoto and H.Maekawa, Activation Cross Section Measurements at Neutron Energy from 13.3 to 14.9 MeV Using the FNS Facility, JAERI 1329, Tokai-mura (October,1993).
- 5.20 Y.Ikeda, Ch.Konno, K.Oishi, T.Nakamura, H.Miyade, K.Kawade, H.Yamamoto and T.Katoh, Activation Cross Section Measurement for Fusion Reactor Structural Materials at Neutron Energy from 13.3 to 15.0 MeV Using FNS Facility, JAERI 1312,Tokai-mura (March,1988).
- 5.21 R.C.Ward, I.C.Gomes and D.L.Smith, A Survey of Selected Neutron-Activation Reactions with Short-Lived Products of Importance to Fusion Reactor Technology, INDC(USA)-106, IAEA, Vienna, (1994).
- 5.22 T.Katoh, K.Kawade and H.Yamamoto, Measurement of Activation Cross Sections, JAERI-M 89-083, Tokai-mura (1989).
- 5.23 N.Yamamuro and S.Iijima, Activation Cross Section Data File(I), JAERI-M 89-129, Tokai-mura(1989).

- 5.24 C.B.A.Forty, R.A.Forrest, D.J.Compton and C.Royner, Handbook of Fusion Activation Data, AEA Fus 180(May,1992), AEA Fus 232(May,1993), AEA Technology, Culham Laboratory, Abingdon, UK.
- 5.25 N.B.Perez, E.T.Cheng, A.B.Pashchenko and H.K.Vonach, Present Status of Activation Cross Section Data for Production of Long-Lived Radionuclides Probably most Important for Waste Disposal, INDC(NDS)-302, IAEA, Vienna, (1994).
- 5.26 A.A.Filatenkov, S.V.Chuvaev, V.N.Absenov and V.A.Jakovlev, Systematic Measurement of Activation Cross Section at Neutron Energies from 13.4-14.9 MeV, INDC(CCP)-402(January,1997).
- 5.27 Y.Kasugai, Y.Ikeda, H.Yamamoto and K.Kawade, Systematics for (n,p) excitation functions in the neutron energy between 13.3 and 15.0 MeV, Ann. Nucl. Energy Vol. 23 No.18, pp1429-1444. (1996).
- 5.28 K.Gul, Systematics of (n,p) and (n, $\alpha$ ) Cross Sections for 14 MeV Neutrons on Basis of Statistical Model, INDC(PAK)-009 (July,1995), IAEA, Vienna.
- 5.29 Nuclear Data For Fusion Reactor Technology, (Ed. S.Cierjacks), NEANDC-307 'U', INDC(GER)-035 (April,1992), KfK, Karlsruhe,5062.
- 5.30 Zhao Wenrong, Lu Hanlin, Yu Weixiang and Yuan Xialin, Compilation of Measurements and Evaluations of Nuclear Activation Cross Sections for Nuclear Data Applications, INDC(CPR)-16, (August,1989), IAEA,Vienna.
- 5.31 H.Liskien, R.Wölfle, R.Widera and S.M.Qaim, Excitation Functions of (n,p) and (n, $\alpha$ ) Reactions on Molybdenum Isotopes, Appl. Radiat.Isot. 41(1990)83-90.
- 5.32 N.I Molla , R.U.Miah, M.Rahman and Aysha Akhter, Excitation Functions of Some (n,p), (n,2n) and (n, $\alpha$ ) Reactions on Nickel,

Zirconium and Niobium Isotopes in the Energy Range 13.64-14.83 MeV, *ibid.* pp.355-357.

- 5.33 K.Kawade, H.Yamamoto, T.Katoh, A.Taniguchi, T.Ikuta, Y.Kasugai, T.Iida and A.Takahashi. Measurement of Formation Cross Section of Short-Lived Nuclei by 14 MeV Neutrons, *ibid.* pp.361-363.
- 5.34 W. Mannhart, D. Schmidt and Xia Haihong, Measurement of the  $^{59}\text{Co}(n,\alpha)^{56}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$  and  $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58\text{m}+g}\text{Co}$  Cross Sections between 8 and 14 MeV, *ibid.*, pp.285-287.
- 5.35 N.I.Molla, R.U.Miah, S.Basunia, S.M.Hossain and M.Rahman, Cross Sections of (n,p), (n, $\alpha$ ) and (n,2n) Processes on Scandium, Vanadium, Cobalt, Copper and Zinc Isotopes in the Energy Range 13.57-14.71 MeV, *ibid.*, pp.938-940.
- 5.36 V.N.Manokhin, A.B.Pashchenko, V.I.Plyaskin, V.M.Bychkov and V.G.Pronyaev, Activation Cross Sections Induced by Fast Neutrons, in Handbook on Nuclear Activation Data, Tech.Rep.Series No.273, IAEA, Vienna, 1987, pp.305-411.
- 5.37 F.Cserpák, S.Sudár, J.Csikai and S.M.Qaim, Excitation Functions and Isomeric Cross Section Ratios of the  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60\text{m}+g}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Cu}(n,\alpha)^{62\text{m}+g}\text{Co}$  and  $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60\text{m}+g}\text{Co}$  Processes from 6-15 MeV, *Phys.Rev.*, C49(1994)1525-1533.
- 5.38 I.G.Birn, B.Strohmaier, H.Freiesleben and S.M.Qaim, Isomeric Cross Section Ratios for the Formation of  $^{75\text{m}+g}\text{Ge}$  in (n,p), (n, $\alpha$ ) and (n,2n) Reactions from 6-15 MeV, *Phys.Rev.*, C52(1995)2546-2551.
- 5.39 Y.Ikeda, E.T.Cheng, C.Konno and H.Maekawa, Measurement of Neutron Activation Cross Sections for the  $^{99}\text{Tc}(n,p)^{99}\text{Mo}$ ,  $^{99}\text{Tc}(n,\alpha)^{96}\text{Nb}$  and  $^{99}\text{Tc}(n,n'\alpha)^{95}\text{Nb}$  and  $^{99}\text{Tc}(n,n')^{99\text{m}}\text{Tc}$  Reactions at 13.5 and 14.8 MeV, *Nucl.Sci.Eng.* 116(1994)28-34.

- 5.40 R. Klopries, R.Dóczy, S.M.Qaim, S.Sudár and J.Csikai, Excitation Functions of some Neutron Threshold Reactions on  $^{89}\text{Y}$  in the Energy Range of 7.8 to 14.7 MeV, *Radiochimica Acta*, 79(1997)3-9.
- 5.41 I.Birn and S.M.Qaim, Excitation Functions of Neutron Threshold Reactions on Some Isotopes of Germanium, Arsenic and Selenium in the 6.3-14.7 MeV Energy Range, *Nucl.Sci.Eng.*116(1994)125-137.
- 5.42 S.M.Qaim, Lack of Evidence for Shell Effects in the (n,p) and (n, $\alpha$ ) Reaction Cross Sections at 14.7 MeV Neutron Energy, *Z.f.Naturforschung*, 25(1970)1977-1978.
- 5.43 Cai Dunjiu, Evaluation of Cross-Sections for Dosimetry Reactions, INDC(CPR)-024(October,1991), IAEA, Vienna.
- 5.44 Yuan Junqian, Kong Xiangzhong, Yang Jingkang and Wang Yongchang, Progress on 14 MeV Neutron Activation Cross Section Measurement at Lanzhou University, INDC(CPR)-032, CNDC-0014(1994)pp.5-8.
- 5.45 S. M. Qaim, St Spellerberg, F. Cserpák and J. Csikai, Radiochemical Measurement of Excitation Function of  $^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$  Reaction from 7.2 to 14.6 MeV, *Radiochimica Acta*, 73 pp. 111-117. (1996).
- 5.46 A. A. Filatenkov, S. V. Chuvaev, V. A. Jakovlev, A. V. Malyshev, S. K. Vasiljev, Systematic Measurement of Cross Sections at Neutron Energies of 13.4-14.9 MeV, NDST-97 May 19-24, 1997 Trieste.
- 5.47 S. V. Chuvaev, A. A. Filatenkov, V. A. Jakovlev, A. V. Malyshev, S. K. Vasiljev, M. Avrigeanu, V. Avrigeanu, Measurement and Analysis of the (n,p), (n, $\alpha$ ), (n,2n) and (n,np) Reaction Cross Sections of  $^{59}\text{Co}$  and  $^{58}\text{Ni}$ , NDST-97 May 19-24, 1997 Trieste.

- 5.48 Y. Kasugai, Y. Ikeda and Y. Uno, Activation Cross Section Measurement for La, Ce, Pr, Nd, Gd, Dy and Er isotopes by 14 MeV Neutrons, NDST-97 May 19-24, 1997 Trieste.
- 5.49 S. Amemiya, K. Ishibashi and T. Katoh, Neutron Activation Cross section of Molybdenum Isotopes at 14.8 MeV, Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 19, No. 10, pp. 781-788, October 1982.
- 5.50 S. M. Qaim, Nuclear reaction Cross-Sections for 14.7 MeV Neutrons on  $^{99}\text{Tc}$ , J. Inorg. Nucl. Chem., 1973, Vol. 35, pp. 3669-3675.
- 5.51 M. Herman, A. Marcinkowski and J. Bielewicz, and P. Oblozinsky, Cross Sections for the (n,p) and (n,n') Reactions on Pd, Cd and Os, Nuclear Physics A297 (1978) 335-346.
- 5.52 S. J. Hasan, A. Pavlik, G. Winkler, M. Uhl and M. Kaba, Precise measurement of cross sections for the reactions  $^{59}\text{Co}(n,2n)^{58\text{m}+g}\text{Co}$  and  $^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$  around 14 MeV, J. Phys. G: Nucl. Phys., 12 (1986) 397-410.
- 5.53 Y. Kasugai, H. Yamamoto, A. Takahashi, T. Iida and K. Kawade, Measurement of Activation Cross Sections on Ta, W for 14 MeV Neutrons, Jaeri-M 93-046.
- 5.54 I. Ribansky, Neutron Activation Cross Section Measurement at Bratislava, INDC (CSR)-008/GI INT (86)-2.
- 5.55 H. D. Luc, P. N. Ngoc, N. V. Do, L. B. Bach, Determination of some (n,p) (n,n'p) and (n, $\alpha$ ) Reaction Cross sections Induced by 14.8 MeV Neutrons on Cr and Ti Isotopes, INDC (VN) -5/GI INT (86)-9.
- 5.56 K. T. Osman and F.I. Habbani, Measurement and Study of (n,p) Reaction Cross.sections for Cr, Ti, Ni, Co, Zr and Mo Isotopes using 14.7 MeV Neutrons, INDC(SUD)-001 (1996).

- 5.57 Y. Junqian, K. Xiangzhong, Y. Jingkan, W. Huaiyi, cross Section Measurements for  $^{199}\text{Hg}(n,p)^{199}\text{Au}$ ,  $^{198}\text{Hg}(n,p)^{198}\text{Au}$ ,  $^{196}\text{Hg}(n,p)^{196}\text{Au}$  and  $^{196}\text{Hg}(n,d+np+pn)^{195}\text{Au}$  Reactions, Communication of Nuclear Data Progress No 13 (1995), INDC(CPRÖ-034/L), pp. 16-18.
- 5.58 A.B.Pashchenko, H.Wienke, J.Kopecky, J.Ch.Sublet and R.A.Forrest, Neutron Activation Cross Section Data Library for Fusion Applications, IAEA-NDS-173(March,1997).
- 5.59 Comparisson of Activation Cross Section Measurements and Experimental Techniques for Fusion Reactor Technology, (Ed. A.B.Pashchenko), INDC(NDS)-301(Julay,1994), INDC(NDS)-319(February,1995), INDC(NDS)-320(February,1995),IAEA,Vienna.
- 5.60 Activation Cross-Sections for the Generation of Long-Lived Radionuclides of Importance in Fusion Reactor Thechnology, (Ed. Wang Dahai), INDC(NDS)-232(January,1990), (Ed. A.B.Pashchenko), INDC(NDS)-286,288(November,1993), INDC(NDS)-340(November,1995), INDC(NDS)-342(February,1996), IAEA, Vienna.
- 5.61 Z.Bödy and J.Csikai, Data for 14 MeV Neutron Actvation Analysis, in Handbook of Nuclear Activation Data, Tech.Rep.Series, No.273, IAEA,Vienna(1987)pp.261-303.
- 5.62 Cs.M.Buczko, J.Csikai, S.Sudár, A.Grallert, S.A.Jonah, B.W.Jimba, T.Chimoye, M.Wagner, Excitation Functions and Isotopic Cross Section of the  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}^{m.g}$  Reactions from 2 to 15 MeV, Phys.Rev.C52(1995)1940-1946.
- 5.63 J.Csikai, Nuclear Data Activities in Hungary, (Proceeding of the 1993 Symposium on Nuclear Data, JAERI-M, 94-019), INDC(JPN)-196, Tokai-mura (1994)pp.408-425.
- 5.64 J.Csikai and S.Nagy, Disintegration of  $^{14}\text{N}$  by Fast Neutrons, Acta. Phys.Hungarica, 21(1966)303-310.

- 5.65 J.Csikai and S.Nagy, Some (n,p) Reaction Cross Sections for 14.7 MeV Neutrons, Nucl.Phys.91(1967)222-224.
- 5.66 Von M., Schmidt-Hönow and W.Herr, Die Aktivierungsschnitte der  $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$  und  $^{18}\text{O}(n,\alpha)^{15}\text{C}$  Reactionen für 14 MeV (d,t) Neutronen, Radiochimica Acta, 17(1972) pp.142-146.
- 5.67 A.B.Lillie, The Disintegration of Oxygen and Nitrogen by 14.1 MeV Neutrons, Phys.Rev. 87(1952)716-722.
- 5.68 M.Bormann, S.Cierjacks, E.Fretwurst, K.J.Giesecke,H.Neuert and H.Pollehn, Untersuchungen über die Energieabhängigkeit von Kernreactionen mit Neutronen im Energiebereich zwischen 12 und 19 MeV, Z.f.Physik 174(1963)1-17.
- 5.69 H.Felber and H. Friedmann, Evaluation of the Cross Section  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  for 14.7 MeV Neutrons by Measurement of the Activity of  $^{14}\text{C}$ , Z.f.Physik, A276(1976)75-78.
- 5.70 M.E.Battat and F.L.Ribe, Formation of  $^6\text{He}$  by 14 MeV Neutron Bombardment of Li and Be, Phys. Rev.89(1953)80-83.
- 5.71 P.Jessen, M. Bormann, F. Dreyer and H. Neuert, Experimental Excitation Functions for (n,p), (n,t), (n, $\alpha$ ), (n,2n), (n,np) and (n,n $\alpha$ ) Reactions, Nuclear Data, Academic Press, New York, London ( 1965) Vol. 1.,103-202.
- 5.72 K. Kawade, H. Yamamoto, T. Kobayashy, T. Katoh, T. Iida and A. Takahashi, Measurement of Formation Cross Sections of Short-Lived Nuclei by 14 MeV Neutrons, JAERI-M, 92-020, (1992), INDC(JPN)-154.
- 5.73 J. Csikai, J. Bacsó, A. Daróczy, Investigations of the Cross Section of Neutron Reactions in the Nucleus  $^{103}\text{Rh}$  Nucl. Phys. 41(1963) 316-322.



- 5.74 R. Pepelnik, B. Anders, B.M. Bahal, Measurements of 14 MeV Neutron Activation Cross Sections, *Radiation Effects*, 92(1986) 211-214.
- 5.75 R. Wölfle, A. Mannan, S.M. Qaim and R.Videra, Excitation Functions of  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90\text{m,g}}\text{Y}$ ,  $^{139}\text{La}(n,\alpha)^{136}\text{Cs}$  and  $^{181}\text{Ta}(n,p)^{181}\text{Hf}$  Reactions in the Energy Range of 12.5-19.6 MeV, *Applied Rad. Isot.*39(1988) 407-412.
- 5.76 J. Csikai, Activation Cross Sections for the Generation of Long-Lived Radionuclides of Importance in Fusion Reactor Technology, [Ed. A.B. Paschenko] INDC(NDS-342) 29-35, IAEA, Vienna, (February, 1996).
- 5.77 Xiangzhong Kong, Yongchang Wang, Jingkang Yang and Junqian Yuan, Cross Sections for (n,p), (n, $\alpha$ ) and (n,2n) Reactions in Rare-Earth Isotopes at 14.7 MeV, *Radiochimica Acta* (in press).
- 5.78 Zhao Wenrong, Yu Weixiang and Lu Hanlin, Cross Section Measurements for Reactions at Neutron Energies of 9.5, 9.9 and 14.7 MeV, *CIAE Annual Report* (1994) pp.23-24.
- 5.79 Y.Satoh, T. Matsumoto, Y. Kasugai, H. Yamamoto, T. Iida, A. Takahashi and K. Kawade, Measurement of Formation Cross Sections Producing Short-Lived Nuclei by 14 MeV Neutrons, -Na, Si, Te, Ba, Ce, Sm, W, Os-, *Proceeding of the 1994 Symposium on Nuklear Data*, JAERI Conf-95-008, pp.189.
- 5.80 K. Sailer, S. Daróczy, P. Raics and S. Nagy, The Cross Sections of (n,2n), (n,p) and (n, $\alpha$ ) Reactions for 14 MeV Neutrons on Isotopes of Cr. and Zr, *Neytronnaya Fizika* 1(1977)276, Moskwa.
- 5.81 V. N. Levkovskii, Empirical behaviour of the (n,p) cross section for 14-15 MeV Neutrons, *Zh. Eksp.Theor. Fiz.* 45,(1963) 305-311.
- 5.82 V.N. Levkovskii, Cross Sections of (n,p) and (n, $\alpha$ ) Reactions at the Neutron Energy of 14-15 MeV, *Jadernaja Physica*, 18(1973) 705-709.

- 5.83 G. Eder, G. Winkler and P. Hille, *Z. Phys.* 253, (1972), 355.
- 5.84 V. M. Bychkov, V. N. Manokin, A. B. Paschenko and V. I. Plyaskin, (1980) INDC (CCP) 146-LJ, 1.
- 5.85 S Ait-Tahar, The systematics of (n,p)cross sections for 14 MeV neutrons, *Nucl. Phys.* 13.(1987) pp.121-125.
- 5.86 S. Selvi and H. H. Erbil, Empirical formulae for 14.5 MeV (n,p) cross sections, INDC(TUR)-002/L.
- 5.87 A. I. Dityuk, A Yu. Konobeyev, V. P. Lunev, Yu. N. Shubin, *New Approach for the Creation of Neutron Threshold Reaction Systematics*, NDST-97, May 19-24, 1997 Trieste.
- 5.88 N. Yamamuro, *A Nuclear Cross Section Calculation System with Simplified Input-Format VERSION-II (SINCROS-II)*, JAERI-M 90-006, Japan Atomic Energy Research Institute (1990).
- 5.89 N. Yamamuro, *Cross-Section Calculations for Neutron-Induced Reactions up to 50 MeV*, *Nucl. Sci. and Eng.*,122(1996) 374-383.
- 5.90 N. Yamamuro, *Calculation of Activation Cross Sections for Molybdenum Isotopes*, *Nucl. Sci. and Eng.*, 109(1991) 128-141.
- 5.91 N. Yamamuro, *Activaton Cross-Section Calculations on the Production of Long-Lived Radionuclides*, *Nucl. Sci. and Eng.*, 118(1994) 249-259.
- 5.92 A.Pavlik and G.Winkler, *Calculation of the Energy Spread and the Average Neutron Energy of the 14 MeV Neutrons Produced via the  $T(d,n)^4He$  Reaction in Solid Ti-T Targets*, INDC(AUS)-011(July,1986), IAEA,Vienna.
- 5.93 J.Csikai, A.Grallert, L.Olah and S.M.Qaim, *Characteristics of Low Energy Accelerator Neutron Sources*, in *Proc. of. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology*, Gatlinburg, Vol.I(Ed. J.K.Dickens), (ANS, USA,1994)pp.78-80.

- 5.94 S.Sudár, A Solution for the Neutron Spectrum Unfolding Problem without Using Input Spectrum, INDC(HUN)-026, IAEA,Vienna(1989).
- 5.95 J.Csikai, Use of Small Accelerator and Isotope Neutron Sources in Materials Research, in Proc. of Int. Conf. on Neutrons and Their Applications, Vol.2339, (Eds. George Vourvopoulos and Themis Paradellis), (SPIE,USA,1994)pp.318-334.
- 5.96 C.M Lederer and V.S.Shirley, Table of Isotopes, 7<sup>th</sup> Edition, John Wiley and Sons, New York,1978.
- 5.97 E.Browne, R.B.Firestone, Table of Radioactive Isotopes, (Ed. V.S.Shirley), John Wiley and Sons, New York,1986.
- 5.98 Table of Isotopes, Eighth Edition, Vol I-II, Eds. Richard B. Firestone and Virginia S. Shirley, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1996.

## 8.

## FÜGGELÉK

## (Publikációk és előadások listája)

1. R. M. Klopries, R. Dóczi, S. Sudár, J. Csikai, S. M. Qaim, Excitation Functions of some Neutron Threshold Reactions on  $^{89}\text{Y}$  in the Energy Range of 7.8 to 14.7 MeV, (Radiochimica Acta 79 (1997) 3-9).
2. J. Csikai, V. Semkova, R. Dóczi, A. D. Majdeddin, M. Várnagy, Cs. M. Buczkó and A. Fenyvesi, Measured, Estimated and Calculated (n, $\alpha$ ) Cross Sections for Fusion Applications, (Fusion Engineering and Design 37 (1997) 65-71).
3. R. Dóczi, V. Semkova, A. D. Majdeddin, Cs. M. Buczkó and J. Csikai, Investigations on (n,p) Cross Sections in the 14 MeV Region, (INDC(HUN)-032, 1997.).
4. A. D. Majdeddin, V. Semkova, R. Dóczi, Cs. M. Buczkó and J. Csikai, Investigations on (n, $\alpha$ ) Cross Sections in the 14 MeV Region, (INDC(HUN)-031, 1997.).
5. R. Dóczi, V. Semkova, A. Fenyvesi, N. Yamamuro, Cs. M. Buczkó and J. Csikai, Excitation Functions of Some (n,p) and (n, $\alpha$ ) Reactions From the Threshold to 16 MeV, (Nuclear Science and Engineering, 129, 1-11, 1998.).
6. L. Oláh, A. M. El-Megrab, A. Fenyvesi, A. D. Majdeddin, R. Dóczi, V. Semkova, S. M. Qaim and J. Csikai, Investigations on Neutron Fields Produced in  $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$  and  $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$  Reactions, (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 404, 373-380, 1998.).
7. R. Dóczi, A. D. Majdeddin, Cs. M. Buczkó and J. Csikai, Status of Systematics in (n, $\alpha$ ) and (n,p) Cross Sections at around 14 MeV, (Conference Proceedings Vol. 59. „Nuclear data for Science and Technology” G. Reffo, A. Ventura and C. Grandi (Eds.) SIF, Bologna, 1997.).
8. V. Semkova, R. Dóczi, A. D. Majdeddin, A. Fenyvesi, Cs. M. Buczkó, N. Yamamuro, S. Sudár, S. Szegedi, J. Csikai, Measurements and Calculations of Excitation Functions of Neutron Induced Activation Reactions, (Conference Proceedings Vol. 59. „Nuclear data for Science and Technology” G. Reffo, A. Ventura and C. Grandi (Eds.) SIF, Bologna, 1997.).
9. C. Nesaraja, F. Cserpák, S. Sudár, R. Dóczi and S. M. Qaim, Excitation Functions of (n,p) and (n, $\alpha$ ) Reactions on some Isotopes of Zn, Ge, Y and Ag, (Conference Proceedings Vol. 59. „Nuclear data for Science

- and Technology” G. Reffo, A. Ventura and C. Grandi (Eds.) SIF, Bologna, 1997.).
10. V. Avrigeanu, S. Sudár, Cs. M. Buczkó, J. Csikai, A. A. Filatenkov, S. V. Chuvaev, R. Dóczy, V. Semkova and V. A. Zelenetsky, Energy Dependence of the Isomeric Cross Section Ratio in the  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}^{\text{m,g}}$  Reactions (Conference Proceedings Vol. 59. „Nuclear data for Science and Technology” G. Reffo, A. Ventura and C. Grandi (Eds.) SIF, Bologna, 1997.).
  11. A. M. El-Megrab, S. A. Jonah, R. Dóczy, A. D. Majdeddin, A. Fenyvesi, V. Semkova, Cs. M. Buczkó, S. Sudár, S. Szegedi, J. Csikai, Measurements and Analysis of Excitation Function of Neutron Induced Reactions Between the Threshold and 20MeV, (Book of Abstract, (INPC-95, Beijing, 1995) pp. 5.4-6.).
  12. S. M. Qaim, R. M. Klopries, St Spellerberg, R. Dóczy, F. Cserpák, S. Sudár, J. Csikai, Formation of Long-Lived Activation Products in Fast Neutron Induced Reactions, (Progress Report on Nuclear Data Research in the Federal Republic of Germany NEA/NSC/DOC(96)24, INDC(Ger-)042).
  13. C. Nesaraja, R. Dóczy, F. Cserpák, S. Sudár, J. Csikai, A. Fessler, B. Strohmaier, S. M. Qaim, Isomeric Cross Sections, (Progress Report on Nuclear Data Research in the Federal Republic of Germany NEA/NSC/DOC(97)13, INDC(Ger-)043).
  14. C. Nesaraja, St Spellerberg, K. H. Linse, R. Dóczy, F. Cserpák, S. Sudár, J. Csikai, A. Fessler, S. M. Qaim, Neutron Activation Cross Sections, (Progress Report on Nuclear Data Research in the Federal Republic of Germany NEA/NSC/DOC(97)13, INDC(Ger-)043).
  15. An Overview of Debrecen-Jülich Cooperation in the Field of Nuclear Sciences (General lecture delivered at the Kossuth Lajos University Debrecen, Hungary, on 31 March 1995.)