

## Az OTKA T 037190 sz. szerződés zárójelentése.

A zárójelentés által lefedett négy évben (2002-2005) a kutatási terv megvalósításában 12 hazai és 25 külföldi (belga, bolgár, egyiptomi, japán, német, orosz) kutató vett részt. Az eredményeket az OTKA támogatás feltüntetésével 15 referált folyóirat cikkben, 11 nemzetközi konferencia kiadványban, 2 nemzetközi kutatási szerződés zárójelentésében és 1 Ph.D. disszertációban közzétettük. A témában résztvevő kutatók és a közlemények száma a fentieknél jelentősen több volt, de itt csak az OTKA T037190 szerződésre hivatkozott referált kiadványokhoz kapcsolódó adatokat szerepeltetjük. Így pl. kimaradtak a magyarnyelvű dolgozatok, a könyvrészletek, a gyűjteményes kiadványok, a különböző szerződések (MTA, JSPS) rész- és zárójelentései. Az OTKA által a beszámolási időszakban nyújtott támogatás legfontosabb eredménye, hogy a DE TTK Kísérleti Fizikai Tanszékén (KFT) fennmaradt az a neutronfizikai kultúra, amely számos hazai és külföldi kutató szakmai sikerén keresztül a tudományterület jelentős fejlődéséhez vezetett.

A kutatási tervnek megfelelően az alábbi területeken történtek vizsgálatok:

1) Neutron indukált magreakciók gerjesztési függvényének mérése és számítása a 0-22 MeV tartományban és 14 MeV körüli bombázó energiáknál, D-T (DE-KFT, V.d.G. Geel),  ${}^7\text{Li}(p,n)$  (V.d.G. ATOMKI) és ciklotron (MGC-20E, ATOMKI, CV 28, Jülich) neutronforrások felhasználásával. 14 MeV körüli energiákon 9 rövid felezési idejű végmaghoz vezető reakcióra mértük meg a hatáskeresztmetszeteket Debrecenben (KFT) az EURATOM IRMM Geel intézettel kötött szerződés keretében, csatlakozva az EC OECD-NEA WPEC kollaborációhoz. A rövid felezési idejű végtermékhez vezető magreakciók vizsgálatát a jövőben nagyban elősegíti a debreceni ciklotronnál és a tanszéki (KFT) neutron generátornál a közelmúltban kiépített gyors csőposta rendszer.

A 7-12 MeV tartományban 4 reakciónál összesen 11 energiaponton végeztünk méréseket az IAEA Reference Neutron Activation Library (IAEA-TECDOC-1285/2002) adatainak kiegészítésére és pontosítására. A  ${}^{28}\text{Si}(n,p)$  reakció gerjesztési függvényét a 7.6-12.5 MeV tartományban elsőként határoztuk meg. Pontosítottuk és bővítettük az un. dozimetriai könyvtár adatait azzal, hogy a  ${}^{115}\text{In}(n,\gamma)$  és a  ${}^{115}\text{In}(n,n'\gamma)$  reakciókra a 0.024-12.4 MeV ill. a 2.14-12.4 MeV tartományban 10 ill. 19 energiaponton mértünk új adatokat, míg a  ${}^{27}\text{Al}(n,p){}^{27}\text{Mg}$  reakció gerjesztési függvényének adatait kiértékelve a 13-15 MeV tartományra új neutron energia monitort adtunk meg  $\sigma(E_n) = (-12.654E_n + 254.12)\text{mb}$  analitikus függvény formájában. A  $\sigma(E_n)$  függvényt a plazma neutronok spektrumára átlagolva lehetőség nyílik a  ${}^{27}\text{Mg}$  aktivitásának mérése alapján a D+T fúziós reaktor hozamának meghatározására is. A dozimetriai reakciók különösen fontos alkalmazási területe a neutron fluxussűrűség spektrum meghatározása kiterjedt, komplex közegek belsejében.

A jelen szerződés 3 kutató résztvevőjének (Cserpák F., Oláh L., Sudár S.) az EC IRMM Geel-i intézetben végzett munkája nagyban elősegítette a Debrecen-Geel közötti szakmai kapcsolatokat és a kutatási terv sikeres megvalósítását a következő eredmények révén: a) A GELINA TOF, valamint a 7MV-os V.d.G. felhasználásával neutron inelasztikus szórás hatáskeresztmetszetek mérése. b) Aktivációs hatáskeresztmetszetek meghatározása a 16-20 MeV tartományban a  ${}^{107}\text{Ag}$ ,  ${}^{109}\text{Ag}$ ,  ${}^{127}\text{I}$  és a  ${}^{129}\text{I}$  izotópokon az  $(n,2n)$ ,  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$  reakciókra. Modell számítások végzése a Pb, Tc, Ag és I izotópokon létrehozott  $(n,\gamma)$ ,  $(n,\alpha)$ ,  $(n,n'\gamma)$ ,  $(n,p)$ ,  $(n,2n)$ ,  $(n,3n)$  reakciók 15 gerjesztési függvényére, valamint az izomer hatáskeresztmetszet viszony energiafüggésére a 0-22 MeV tartományban a STAPRE és az EMPIRE kódok alkalmazásával.

Debrecen-Jülich(KFA)-Kairó együttműködésben analizáltuk azon  $(n,p)$  reakciók gerjesztési függvényét, amelyek a  ${}^{32}\text{P}$ ,  ${}^{64}\text{Cu}$ ,  ${}^{67}\text{Cu}$ ,  ${}^{89}\text{Sr}$ ,  ${}^{90}\text{Y}$  és a  ${}^{153}\text{Sm}$  terápiás célú

radioizotópok termelését eredményezik. A differenciális adatokat a Be(d,n) reakcióból származó spektrumra átlagolt hatáskeresztmetszettel ellenőriztük 14 MeV deuteron energiánál, a jülichi CV 28 ciklotron felhasználásával. A vizsgálatok az izotóp termelési adatok meghatározásán túl, lehetőséget adtak a STAPRE és az EMPIRE 2.19 modell számítások, valamint az IRDF-2002 legújabb dozimetriai könyvtár ellenőrzésére is. Vizsgálataink szerint a folytonos neutron spektrum kísérleti meghatározására a 2 MeV alatti tartományban az aktivációs küszöbdetektorok kedvezőbben alkalmazhatók mint a direkt mérési módszerek, ami számos vizsgálatot tesz lehetővé, így pl. a reakció sebességeloszlás mérését kiterjedt közegek belsejében.

Ezen kutatások fő célja új és pontosabb adatok szolgáltatása a küszöbtől 22 MeV energiáig tudományos (magreakció modellek ellenőrzése, szisztematikák és nemzetközi adatbankok pontosítása, gerjesztési függvények normalizálása) és technológiai (az európai fúziós reaktor tervezése, radioaktív hulladékok gyorsítós átalakítása (ATW, ADT), sugárvédelmi, sugárkárosodási és dozimetriai adatok pontosítása, tiltott és veszélyes anyagok észlelése) alkalmazásokhoz.

2) Eredményesnek bizonyult a küszöb-80 MeV tartományban protonokkal és deuteronokkal kiváltott magreakciók gerjesztési függvényeinek vizsgálata Brüsszel-Debrecen-Sendai-Obninszk négyes kooperációban. A kutatásokhoz a Tohoku Egyetem (Sendai, Japán) és a Brüsszeli Vrije Egyetem protonokra 80 MeV és 33 MeV energiájú ciklotronjait használtuk a Zn, Pt, Ir, Cd céltárgyak fóliakötegének besugárzására. Proton besugárzásnál a keletkező elemek különböző izotópjaira 52, míg 40 MeV energiájú deuteronokkal az Ir céltárgy esetén 9 gerjesztési függvényt határoztunk meg a küszöbtől 70-80 MeV ill. az 1.7-38 MeV tartományban. A különböző céltárgyak esetén a következő elemek izotópjainak keletkezését vizsgáltuk:  $Zn(p,x) \rightarrow Ga, Zn, Cu, Ni, Co, Mn$ ;  $Pt(p,x) \rightarrow Au, Pt, Ir$ ;  $Ir(p,x) \rightarrow Pt, Ir, Os$ ;  $Cd(p,x) \rightarrow Cd, Ag, In$ ;  $Ir(d,x) \rightarrow Pt, Ir$ . A mért 61 gerjesztési függvény zömére korábban egyáltalán nem volt adat, vagy egy részükre csak igen hiányosak. A vizsgálatok lehetőséget adtak az ALICE-IPPE elméleti modell kód alkalmazhatóságának ellenőrzésére és továbbfejlesztésére, a reakció küszöb - 80 MeV közbülső energiatartományban.

Ezen vizsgálatok elsődleges célja a töltött részecske reakciók gerjesztési függvényének meghatározása a küszöb-100 MeV energiatartományban a különböző alkalmazásokhoz: adatok szolgáltatása a vékonyréteg aktivációs technikához (TLA), orvosi célú főleg PET izotópok termelése, spallációs neutronforrások fejlesztése, gyorsítók szerkezeti anyagainak aktiválódása, fémek kopásvizsgálata, sugárzási és árnyékolási hatások az űrben, sugárterápia, elméleti modellek főleg az ALICE-IPPE kód ellenőrzése. Ez utóbbi neutronok esetében a források hiányában nem volt lehetséges.

3) Alkalmazás jellegű kutatásaink egyikét képezte a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) által koordinált programban történt részvétel a lakosságot veszélyeztető taposóaknak észlelésére alkalmas nukleáris módszerek kidolgozása révén, amely a tiltott (kábitószerek) és veszélyes (robbanó) anyagok kimutatásához kapcsolódott. A plasztik töltetű taposóaknak detektálására hordozható neutron lassulós eszközt dolgoztunk ki és megvizsgáltuk az érzékenységi, megbízhatósági paramétereit (térbeli és mélységi feloldás, talajkörnyezeti hatások, észlelési küszöb, stb.). Akna utánzatra  $1m^2/1.5min$  átvizsgálási sebességet kaptunk, ami ugyan rosszabb, mint az elektromágneses detektoré fémek esetén, de már 30g plasztik robbanó anyag a neutron visszaszórásban észlelt anomália révén kimutatható. Az anomália beazonosítására egy új módszert, az un. Neutron Rugalmas Visszaszórási Spektroszkópiát

(EBS) dolgoztuk ki, ( $\alpha, n$ ) forrás spektrumára alapozva. Ezzel a H, C, N és O elemek atomarányai határozhatók meg, amelyek jellemzők a tiltott és veszélyes anyagok típusára.

Proton visszalökéses módszerrel megmértük több kiterjedt közege a különböző neutronforrásoktól [PuBe,  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^2\text{H}(d, n)$ ,  $^3\text{H}(d, n)$ ,  $^9\text{Be}(d, n)$ ] eredő kifolyási fluxussűrűség spektrumot,  $\phi(r, E)$ , az 1.2-15 MeV tartományban, majd ennek ismeretében a reakciósebesség,  $R(E) = \phi(r, E)\sigma(E)$  térbeli eloszlását határoztuk meg a rendelkezésre álló  $\sigma(E)$  gerjesztési függvények alapján, az ( $n, n'\gamma$ ) reakciókra a C, O és Si esetén. A spektrumra átlagolt reakciósebességek mintavastagság függésére exponenciális csökkenést kaptunk, ami a nukleáris módszerek mélységi érzékenységére talajkörnyezetben  $\sim 15\text{cm}$  értéket ad. Megvizsgáltuk a jel/zaj viszony távolság és közeg függését, valamint ellenőriztük a nemzetközi adatbankok ajánlásainak megbízhatóságát.

A különböző közegekre mért kifolyási neutron spektrumot összevetettük az MCNP-4C kód alapján számolttal, ami a differenciális hatáskeresztmetszetek ellenőrzését tette lehetővé. Az ATW berendezések spallációs neutronforrásait nehézfém céltárgyakra alapozzák, így pl. a Bi-Pb eutektikus vegyületre. Az ATW, ADT berendezések tervezéséhez, 9.5 MeV deuteron energiánál megmértük a Be( $d, n$ ) forrástól származó neutronok Bi lemezeken áthaladt kifolyási spektrumát a 2-14 MeV tartományban, 14cm Bi réteg vastagságig (140kg). A vizsgálat, amelyet elsőként végeztünk lehetővé tette az ENDF/B-VI és más adatbázisra alapozott MCNP-4C számítások alkalmazhatóságának ellenőrzését. A mérések az EC JRC IRMM (Belgium) szerződés keretében, míg az MCNP számítások magyar-bolgár együttműködésben történtek.

4) A témában elért eredmények közül kiemelkedőnek ítélem meg a kiterjedt, komplex összetételű közegek esetén a hidrogén koncentráció roncsolásmentes meghatározására kidolgozott módszert. A kadmium tartóba helyezett mintában, annak hidrogéntartalmától függően, a moderátorból érkező epitermikus neutronok termalizálódnak, amelynek fluxusa  $1/v$  detektorral, pl. a  $^{164}\text{Dy}(n, \gamma)$  reakció révén, a mintán kívül is jól mérhető. A módszer 2 nagyságrenddel érzékenyebb, mint a korábban alkalmazott termikus neutron reflexiós eljárás. Debrecen-Tsukuba(KEK, Japán) együttműködésben igazoltuk a módszer nagy érzékenységét grafit moderátor esetében is, amelynek előnye, hogy a neutron fluxus a pontforrástól mért távolsággal lassan változik és így a kiterjedt minta összetétele kedvezően analizálható. Debrecen-Kairó-Tsukuba együttműködésben analitikus összefüggést adtunk meg a relatív fluxus ( $R$ ) és a mintában lévő hidrogénatomok száma ( $N_H$ ) közötti kapcsolat leírására, amelynek formája  $N_H > 10^{22}$  érték esetén:  $R(N_H) = C \exp(kN_H)$ . Ezen eredmény alapján részesült a témában résztvevő egyik kutató, Dóczi Rita a 2005. évi Fermi-díjban.

Az általunk korábban bevezetett neutron-visszaszórási hatáskeresztmetszet,  $\sigma_\beta$ , alapján meghatároztuk elemekre, vegyületekre, keverékekre azt a vastagságot (pl.  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ), amely a termikus neutron reflexió szempontjából a hidrogénnel ekvivalens. Ezen adatok lehetővé teszik a különböző összetételű mintáktól eredő neutron reflexió becslését, hidrogéntartalmuk meghatározási korlátját és a Maxwell spektrumra átlagolt rugalmas neutronszórási hatáskeresztmetszet,  $\sigma_{EL}$ , meghatározását, az általunk kapott  $\sigma_\beta = 0.6\sigma_{EL}$  összefüggés alapján. Kísérleti adatainkkal a JEF-2.2, ENDF/B-VI, JRNDL-3.2, BROND-2, CENDL-2 könyvtárak ajánlásait ellenőriztük az elemek  $\sigma_{EL}$  értékeire.

Debrecen-Kairó együttműködésben Kairóban kidolgoztunk egy 740GBq teljes aktivitású, 4 Am-Be neutronforrásra alapozott olyan termikus és epitermikus besugárzó rendszert, amely lehetővé teszi kg tömegű és liter térfogatú minták hidrogéntartalmának meghatározását és elemvizsgálatát neutron aktivációval.

5) Hevesy György Fermivel egy időben, 1934-ben hozott létre először neutronok által indukált atommagreakciót és ő vezette be 1936-ban a neutron aktivációs analízist. Ennek alkalmazását évtizedeken keresztül megnehezítette a komplex minták neutronteret zavaró hatása, a fluxus depresszió és az önárnyékoláson keresztül. A OTKA téma keretében sikerült egy egyszerű kísérleti módszert kidolgozni az ismeretlen összetételű kiterjedt közegek elemzésére, termikus és epitermikus neutron aktivációval. A mintában kialakuló átlagos aktiváló neutron fluxust a jelenlévő erősen abszorbeáló elemek döntően befolyásolják, amit a fluxus perturbációs faktoral,  $F$ , vesznek figyelembe:  $F = \langle \phi \rangle / \langle \phi_0 \rangle$ , ahol  $\langle \phi_0 \rangle$  és  $\langle \phi \rangle$  a perturbálatlan és az átlagos aktiváló fluxust jelöli. A beszámolási időszakban szisztematikus vizsgálatokat végeztünk az  $F$  faktor meghatározására hidrogénes (Debrecen) és grafit (Tsukuba, Japán) moderátorok esetén különböző kémiai összetételű mintákra, ami igazolta a módszerünk alkalmazhatóságát. Megmutattuk, hogy egy 3cm átmérőjű és 7cm magas Fe ill. PVC minta esetében az  $F$  faktor értéke  $\sim 0.5$  ill.  $\sim 0.3$ , ami a mért aktivitás jelentős korrekcióját eredményezi.

**Az 1) -5) pontokban ismertett eredmények referált folyóiratokban, nemzetközi fórumokon közlésre kerültek.**

Debrecen, 2006 február 24

Dr. Csikai Gyula  
témavezető