

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

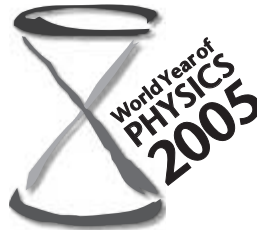
A Fizikai Szemle az Akadémia által 1862-ben elindított Matematikai és Természettudományi Értesítő és az 1891-ben Eötvös Loránd által alapított Matematikai és Physikai Lapok utóda és folytatása

LV. évfolyam

10. szám

2005. október

NEM ÉLHETÜNK



FIZIKA NÉLKÜL



## A REAKCIÓCSATORNA HATÁSA AZ IZOMÉR HATÁSKERESZTMETSZET-ARÁNYRA

Syed M. Qaim<sup>1</sup>, Sudár Sándor<sup>1,2</sup>, Andreas Fessler<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institut für Nuklearchemie, Forschungszentrum Jülich, Németország

<sup>2</sup>Kísérleti Fizika Tanszék, Debreceni Egyetem

<sup>3</sup>Institute for Reference Materials and Measurements, Geel, Belgium

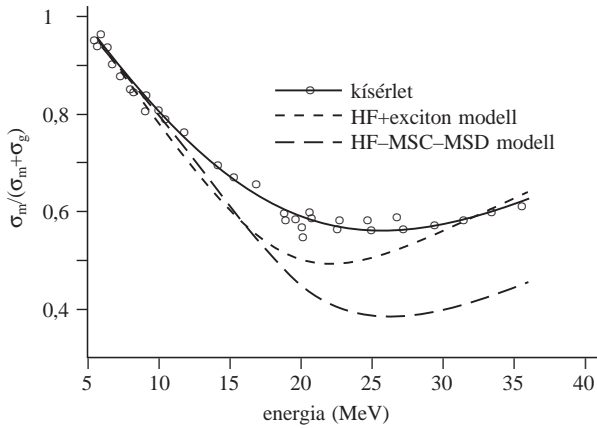
Az izomér hatáskeresztmetszet-arányok vizsgálata jelentős érdeklődésre tarthat számot. Megmutatták [1], hogy az izomér hatáskeresztmetszet-arányt elsősorban a két érintett magnívó spinje határozza meg, ezek gerjesztési energiái és távolságuk kisebb szerepet játszik. További kísérletekben, amelyekben a  $^{73m}\text{gSe}$  magot hat különböző magreakcióban [2], a  $^{58m}\text{gCo}$  magot hét különböző magreakcióban [3], és a  $^{94m}\text{gTc}$  három magreakcióban [4] hozták létre a céltárgy, a bombázó és a távozó részecske különböző kombinációival, részletesen tanulmányozták a keletkezett atommag nívószerkezetének, a preequilibrium-bomlás impulzuszórási arányainak és a különálló nívók gamma-elágazási arányainak a hatását. Neutron által indukált reakciókban tanulmányozták ugyan már a reakciócsatorna hatását az izomér hatáskeresztmetszet-arányra, de az eredmények nem voltak meggyőzőek [5, 6]. Mindezen kísérleteknek a közös vonása az volt, hogy az összetett mag bomlásakor csak egyetlen nukleon, néha egy alfa-részecske játszott szerepet. Hasznosnak tűnt tehát bonyolultabb reakciók vizsgálata, mint például  $(n,t)$ ,  $(^3\text{He},t)$  és  $(^3\text{He},\alpha p)$ , és az ezekből származó izomér hatáskeresztmetszet-arányok összehasonlítása egyszerűbb re-

akciókéval, mint  $(p,n)$  stb. Az eredmények rávilágíthatnak a reakciócsatornának az izomér hatáskeresztmetszet-arányra gyakorolt esetleges hatására. Mi a  $^{52m}\text{gMn}$  izomérpár vizsgálatát választottuk  $^{52}\text{Cr}(p,n)$ ,  $^{52}\text{Cr}(^3\text{He},t)$ ,  $^{54}\text{Fe}(d,\alpha)$ ,  $^{54}\text{Fe}(n,t)$  és  $^{54}\text{Fe}(^3\text{He},\alpha p)$  reakciókban. A metastabil állapot spinje  $2^-$  az alapállapoté pedig  $6^+$ . Mindkettő elektronbefogással és pozitronbomlással is bomlik, a metastabil állapot csaknem függetlenül,  $^{52}\text{Cr}$ -ra. Minden mérést radiokémiai módszerekkel végeztünk. A reakciómechanizmus megértése érdekében magmodellszámításokat végeztünk a nemrég kifejlesztett EMPIRE-II kóddal.

### Kísérleti körülmények

A töltött részecskék által keltett reakciók gerjesztési függvényeinek mérésére a standard fóliaszendvics-technikát használtuk. Vékony mintákat készítettünk elektrolitikus úton. A besugárzásokat Jülichben, a CV 28 kompakt ciklotronon végeztük, és a nyalábáramot monitorreakciókkal határoztuk meg. A két izomér állapot radioaktivitását nagy tisztaságú (HPGe) detektorral végzett gamma-spektrometriával mértük. Mivel alacsony bombázó energián a  $^{52g}\text{Mn}$  létrejöttének viszonylag alacsony

Csikai Gyulának ajánlva, 75-ik születésnapjára. Fordította Sükösd Csaba.



1. ábra. Kísérleti és elméleti izomér hatáskeresztmetszet-arányok a  $^{52}\text{Cr}(p,n)$  reakcióban létrejött  $^{52m,g}\text{Mn}$  izomérpárra, a bombázó proton-energia függvényében. A kísérleti adatok [8]-ből valók.

a hatáskeresztmetszete, a terméket radiokémiaiilag elválasztottuk. A  $^{52}\text{Cr}(^3\text{He},t)^{52m,g}\text{Mn}$ ,  $^{52}\text{Cr}(p,n)^{52m,g}\text{Mn}$  és  $^{54}\text{Fe}(d,\alpha)^{52m,g}\text{Mn}$  mérések részleteit máshol közöljük [7–9]. A  $^{54}\text{Fe}(^3\text{He},\alpha p)^{52m,g}\text{Mn}$  folyamatot a korábbiakhoz [7–9] hasonló technikával vizsgáltuk, és az eredményeket [10] ismerteti.

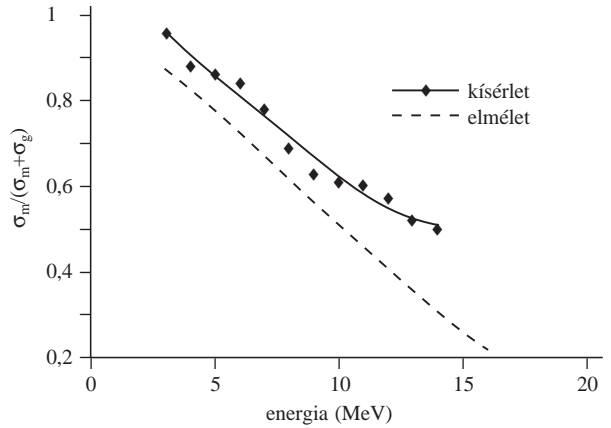
A  $^{54}\text{Fe}(n,t)^{52m,g}\text{Mn}$  reakcióra vonatkozó mérésekhez három neutronforrást használtunk: a) d/t neutrongenerátor Jülichben [11], b) d/t neutronforrás a geeli Van de Graaff generátornál [10], c) d/Be breakup neutronforrás Jülichben a JULIC közepes energiájú ciklotron mellett [12]. Minden esetben aktivációs technikát használtunk. E mérések részleteit korábban már közöltük [10–12].

Minthogy a két érintett izomér állapotra vonatkozó hatáskeresztmetszetek független kísérletekből származnak, az izomér hatáskeresztmetszet-arányokra vonatkozó teljes mérési bizonytalanságok valamivel nagyobbak, mint az egyes hatáskeresztmetszeteké. A töltött részecske reakciókból származó hatáskeresztmetszet-arányok bizonytalanságait 16–18%-ra becsüljük, míg a neutronos mérésekből származókat 25–30%-ra.

## Magmodellszámítások

Az izomér hatáskeresztmetszeteket Herman és munkatársai [13] által kifejlesztett EMPIRE-II (2.19 verzió Lodi) számítógépes kóddal számítottuk ki a  $^{52}\text{Cr}(p,n)^{52m,g}\text{Mn}$ ,  $^{52}\text{Cr}(^3\text{He},t)^{52m,g}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Fe}(d,\alpha)^{52m,g}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Fe}(n,t)^{52m,g}\text{Mn}$  and  $^{54}\text{Fe}(^3\text{He},\alpha p)^{52m,g}\text{Mn}$  reakciókra. Ez a kód a statisztikus részre a Hauser–Feshbach-modellt használja (beleértve a szélességek fluktuációjának korrekcióját [HRTW]), és az excitonmodellt a magreakció precompound részére. A standard könyvtárat használtuk a bementi paraméterek megadására; ez tartalmazta az atommagtömegeket, az alapállapot deformációkat, a különálló nivókat és a bomlási sémákat, nivósűrűségeket, tehetetlenségi nyomatékokat (MOMFIT) és a gamma-sugárzások gerjesztési függvényeit.

A részecske-transzmissziós együtthatókat – mind az exciton-, mind a Hauser–Feshbach-formalizmus számára – gömbszimmetrikus optikai modellel, a SCAT 2 [14, 15] számítógépes kóddal állítottuk elő. A számításokhoz



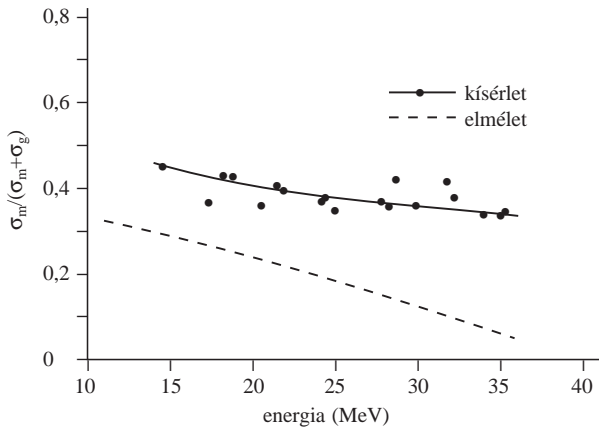
2. ábra. Kísérleti és elméleti izomér hatáskeresztmetszet-arányok a  $^{54}\text{Fe}(d,\alpha)$  reakcióban létrejött  $^{52m,g}\text{Mn}$  izomérpárra, a bombázó deuteron-energia függvényében. A kísérleti adatok [9]-ből valók.

szükséges globális paramétereket neutronokra és protonokra Koning és Delaroche [16], míg az alfa-részecskék számára McFadden és Satchler [17] munkáiból vettük. A  $^{54}\text{Fe}(^3\text{He},\alpha p)^{52m,g}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Fe}(d,\alpha)^{52m,g}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Fe}(n,t)^{52m,g}\text{Mn}$  és a  $^{52}\text{Cr}(^3\text{He},t+dn)^{52m,g}\text{Mn}$  reakcióknál csak a Hauser–Feshbach (HF) modellel végeztünk számításokat. A  $^{52}\text{Cr}(p,n)^{52m,g}\text{Mn}$  reakció esetén azonban egyrészt a HF–MS–C–MSD modell mellett a HF–DEGAS excitonmodellt [18] is használtuk, impulzusmomentum-megmaradással és gamma-bomlásokkal. A nivósűrűségeket a kritikus gerjesztési energiák alatt az EMPIRE-II dinamikus módszerével számítottuk ki a szuperfolyékony modell (BSC) formalizmusával, a kritikus energia felett pedig a Fermi-gáz-modellel. Sajnos az EMPIRE kód az egymást megelőző folyamatokat csak a neutron- és protoncsatornáknál tudta kezelni.

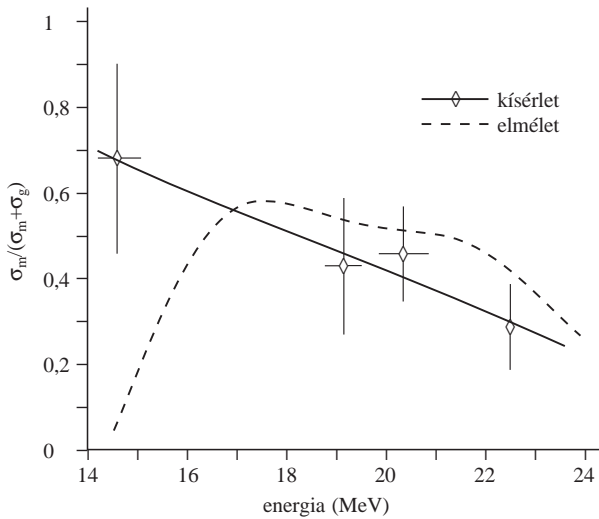
## Eredmények és diszkusszió

### A kísérleti és elméleti adatok összehasonlítása

A  $^{52m,g}\text{Mn}$ -pár kísérleti izomér hatáskeresztmetszet-arányai láthatók az öt vizsgált reakcióra az 1–5. ábrán. A számított értékeket ugyancsak feltüntettük mindegyik ábrán. A kísérlet és az elmélet között a legjobb egyezést a  $^{52}\text{Cr}(p,n)^{52m,g}\text{Mn}$  reakció esetén találjuk (1. ábra), ahol a számításokat a HF+exciton modellel végeztük. Hasonló eredmények adódtak 20 MeV-ig, ha a számítást a HF–MS–C–MSD modellel végeztük. 20 MeV fölött azonban az ezzel a formalizmussal számított értékek konzisztensen mind a kísérleti, mind pedig a HF+exciton modellel kapott értékek alatt vannak. A másik négy reakciónál – tekintettel arra, hogy ezekben összetett részecskék emittálódnak – csak HF-számításokat lehetett végezni. A  $^{54}\text{Fe}(d,\alpha)^{52m,g}\text{Mn}$  reakciónál a számított értékek valamivel alacsonyabbak, a  $^{54}\text{Fe}(^3\text{He},\alpha p)^{52m,g}\text{Mn}$  reakciónál pedig jelentősen alacsonyabbak, mint a kísérleti értékek, jöhetnek a kísérleti és az elméleti görbék alakja nagyon hasonló (2. és 3. ábra). Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a HF-módszer egyedül (azaz elhanyagolva a precompound részt) alulbecsüli a  $2^+$  gerjesztett állapot járulékat a  $6^+$  alapállapotéhoz viszonyítva. Az  $^{54}\text{Fe}(n,t)^{52m,g}\text{Mn}$  reakciónál a számított értékek többé-kevésbé összhang-



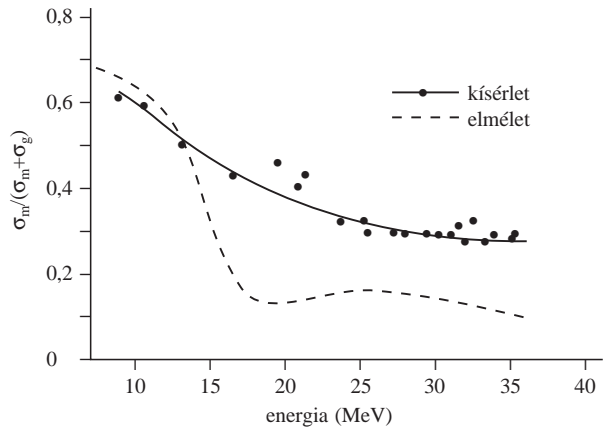
3. ábra. Kísérleti és elméleti izomér hatáskeresztmetszet-arányok a  $^{54}\text{Fe}(^3\text{He}, \alpha p)$  reakcióban létrejött  $^{52m,g}\text{Mn}$  izomérpárra, a bombázó  $^3\text{He}$  energiája függvényében. A kísérleti adatok [10]-ból valók.



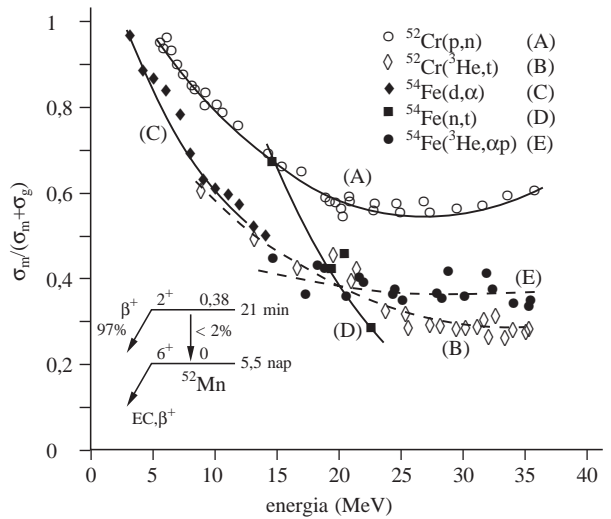
4. ábra. Kísérleti és elméleti izomér hatáskeresztmetszet-arányok a  $^{54}\text{Fe}(n, t)$  reakcióban létrejött  $^{52m,g}\text{Mn}$  izomérpárra, a bombázó neutron-energia függvényében. A kísérleti adatok [10–12]-ből valók. Tekintettel a nagy mérési bizonytalanságokra, a 14,6 MeV-es adatpontot [11] kissé lejjebb csúsztattuk. A 22,5 MeV-es adatot csak durva becslésnek kell tekinteni, hiszen ezt az 53 MeV d/Be breakup neutronspektrummal mérték.

ban vannak a kísérleti adatokkal 19 és 23 MeV között, azonban jelentősen eltérnek attól a reakcióküszöb közelében (4. ábra). Nyilvánvalóan az alacsonyabb impulzusmomentumú izomér járulékat drasztikusan alulbecsüli ez a módszer a reakcióküszöb közelében. Ugyancsak a  $^{52}\text{Cr}(^3\text{He}, t)^{52m,g}\text{Mn}$  folyamatra számított adatok igen érdekesen viselkednek: jó egyezés van a kísérleti adatokkal körülbelül 15 MeV-ig, ám e fölött az elméleti adatok hirtelen lecsökkennek, és a kísérleti adatok alatt maradnak a vizsgált energiatartomány végéig (5. ábra). Ez a reakció azonban különleges, hiszen itt egyrészt direkt töltéscserélő folyamatok, másrészt t-, dn-, p2n-, 2np-, illetve npn-részecskéket kibocsátó folyamatok is végbemehetnek.

A fentiekből leszűrhető, hogy az elmélet csak egyszerű nukleonemissziós reakciónál tudja jól leírni az izomér hatáskeresztmetszeteket nagy energiatartományban. Bonyolultabb reakciónál az elmélet és a kísérleti adatok között viszonylag nagy eltérés van. Ez utóbbi esetben valószínűleg a direkt reakciónak nagy járuléka lehet, ezeket viszont a statisztikus számítások nem veszik figyelembe.



5. ábra. Kísérleti és elméleti izomér hatáskeresztmetszet-arányok a  $^{52}\text{Cr}(^3\text{He}, t+dn)$  reakcióban létrejött  $^{52m,g}\text{Mn}$  izomérpárra, a bombázó  $^3\text{He}$  energiája függvényében. A kísérleti adatok [7]-ből valók.



6. ábra. Kísérleti és elméleti izomér hatáskeresztmetszet-arányok több különböző magreakcióban [7–12] létrejött  $^{52m,g}\text{Mn}$  izomérpárra, a bombázó részecskék energiájának függvényében.

Az 1–5. ábrán látható kísérleti adatok a részt vevő állapotok impulzusmomentumának (spinjének) fontosságát is megerősítik. Az alacsonyabb impulzusmomentumú izomér állapot hatáskeresztmetszete növekvő bombázó energiával jobban csökken, mint a magasabb spinű alapállapoté.

### A reakciócsatorna hatása

A kísérletileg megmért izomér hatáskeresztmetszet-arányokat ábrázoltunk a bombázó energia függvényében (6. ábra). Mindegyik reakciónál kezdetben csökken az arány, de nagy gerjesztési energiákon csaknem állandó értékre áll be. Érdekes megjegyezni, hogy a (p,n) és a ( $^3\text{He}, t$ ) reakciók (A és B görbék) azonos céltárgymagon játszódnak le, és a létrejött mag is azonos. Ugyanez vonatkozik a (d,  $\alpha$ ), (n,t) és ( $^3\text{He}, \alpha p$ ) reakciókra (C, D és E görbék). Az izomér hatáskeresztmetszet-arányok abszolút értékei azonban jelentősen eltérnek. A megfigyelt trendből arra lehet következtetni, hogy a reakciócsatorna jelentősen befolyásolja az izomér hatáskeresztmetszet-arányt, különösen akkor, ha a reakciócsatornák nagyon különbözőek: például (p,n) és ( $^3\text{He}, t$ ) folyamatok.

Köszönjük H.H. Coenennek e munka támogatását, valamint a jülichi kompakt ciklotron és a geeli Van de Graaff gyorsító munkatársainak a besugárzások elvégzését.

## Irodalom

1. S.M. QAIM: *Recent developments in the study of isomeric cross sections* – Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (szerk. J.K. Dickens), American Nuclear Society Inc., LaGrange Park, 1994, p. 186
2. S.M. QAIM, A. MUSHTAQ, M. UHL: *Isomeric cross-section ratio for the formation of  $^{73m,g}\text{Se}$  in various nuclear reactions* – Phys. Rev. C38 (1988) 645
3. S. SUDÁR, S.M. QAIM: *Isomeric cross-section ratio for the formation of  $^{58m,g}\text{Co}$  in neutron, proton, deuteron and  $\alpha$ -particle induced reactions in the energy region up to 25 MeV* – Phys. Rev. C53 (1996) 2885
4. B. STROHMAIER, M. FASSBENDER, S.M. QAIM: *Production cross sections of ground and isomeric states in the reaction system  $^{93}\text{Nb}+\alpha$ ,  $^{92}\text{Mo}+\alpha$  and  $^{94,95}\text{Mo}+p$*  – Phys. Rev. C56 (1997) 2654
5. I.-G. BIRN, B. STROHMAIER, H. FREIESLEBEN, S.M. QAIM: *Isomeric cross-section ratios for the formation of  $^{75m,g}\text{Ge}$  in  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$  and  $(n,2n)$  reactions from 6 to 15 MeV* – Phys. Rev. C52 (1995) 2546
6. C.D. NESARAJA, S. SUDÁR, S.M. QAIM: *Cross sections for the formation of  $^{60m,g}\text{Zn}$  and  $^{71m,g}\text{Zn}$  in neutron induced reactions near their threshold: Effect of reaction channel on the isomeric cross section ratio* – Phys. Rev. C68 (2003) 024603
7. A. FESSLER, Z.B. ALFASSI, S.M. QAIM: *Excitation functions of  $^3\text{He}$ -particle induced nuclear reactions on natural chromium: possibilities of production of  $^{52}\text{Fe}$ ,  $^{53}\text{Fe}$  and  $^{52}\text{Mn}$  for medical use* – Radiochim. Acta 65 (1994) 207
8. A.T.J. KLEIN, F. RÖSCH, S.M. QAIM: *Investigation of  $^{50}\text{Cr}(d,n)^{51}\text{Mn}$  and  $^{nat}\text{Cr}(p,x)^{51}\text{Mn}$  processes with respect to the production of the positron emitter  $^{51}\text{Mn}$*  – Radiochim. Acta 88 (2000) 253
9. M.R. ZAMAN, S. SPELLERBERG, S.M. QAIM: *Production of  $^{55}\text{Co}$  via the  $^{54}\text{Fe}(d,n)$ -process and excitation functions of  $^{54}\text{Fe}(d,t)^{53}\text{Fe}$  and  $^{54}\text{Fe}(d,\alpha)^{52m}\text{Mn}$  reactions from threshold up to 13.8 MeV* – Radiochim. Acta 91 (2003) 105
10. A. FESSLER: *Activation cross sections and isomeric cross section ratios in neutron induced reactions on Cr-, Fe-, and Ni-isotopes in the energy range 9 to 21 MeV* – Jül-Report 3502, Forschungszentrum Jülich, 1998.
11. S.M. QAIM, G. STÖCKLIN: *A systematic investigation of  $(n,t)$  reactions at 14–15 MeV on medium and heavy mass nuclei* – J. Inorg. Nucl. Chem. 35 (1973) 19
12. S.M. QAIM, R. WÖLFLE: *Triton emission in the interactions of fast neutrons with nuclei* – Nucl. Phys. A295 (1978) 150
13. M. HERMAN, R. CAPOTE, B. CARLSON, P. OBLOZINSKY, M. SIN, A. TRKOV, V. ZERKIN: *EMPIRE-II, Nuclear Reaction Model Code, Version 2.19 (Lodi)* – International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005. <http://www-nds.iaea.org/empire/index.html>
14. O. BERSILLON: *Un programme de modele optique spherique* – CEA-N-2272, Centre d'Etudes de Bruyères-le Châtel, 1981.
15. J. RAYNAL: *Notes on ECIS* – CEA-N-2772, Commissariat à l'Energie Atomique, 1994.
16. A.J. KONING, J.P. DELAROCHE: *Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV* – Nuclear Physics A713 (2003) 231
17. L. MCFADDEN, G.R. SATCHLER: *Optical model analysis of the scattering of 24.7 MeV alpha particles* – Nucl. Phys. 84 (1966) 177
18. E. BÉTÁK, P. OBLOZINSKY – INDCC(SLK)001, IAEA, Vienna, 1993.

# NEUTRONAKTIVÁCIÓS ANALÍZIS 5 Ci (185 GBq) Am–Be NEUTRONFORRÁSSAL

Sunday A. Jonah  
Energetikai Kutató és Oktató Központ (CERT),  
Ahmadu Bello Egyetem, Zaira, Nigéria

CERT-ben (Zaria, Nigéria) egy 185 GBq aktivitású, Am–Be neutronforrást telepítettek. A forrást paraffinmoderátorral vették körül, hogy termikus neutronaktivációs analízis (TNAA) céljaira használható legyen [1]. A neutronforrást mangánkoncentrációjának neutronaktivációs analízissel történő meghatározására használták mangán-érceben, valamint alumíniumkoncentrációjának meghatározására bauxitban [2, 3]. A berendezés besugárzó csatornájában lévő viszonylag magas gyorsneutronhányad miatt külön módszert kellett kidolgoznunk az Al/Si tömegarány alumino-szilikátokban történő meghatározására [4]. Annak érdekében, hogy a gyorsneutronos aktivációs analízishez viszonylag kis aktivitású izotópos neutronforrást lehessen használni, szükséges a gyorsneutronfluxus ismerete a szabad, árnyékolatlan forrás közelében [5]. Ez igazolja, hogy meg kellett határozni berendezésünk jellemzőit az Al, Fe és Si ásványokból, valamint koncentrátumokból gyorsneutronaktivációs analízissel történő kimutatásához. Ezek az elemek a könnyű és közepes atommagok azon csoportjához tartoznak, ahol az  $(n,p)$  reakciók mennek végbe a

legkönnyebben – összehasonlítva az  $(n,\alpha)$  és  $(n,2n)$  reakciókkal – az Am–Be forrásból származó gyorsneutronos NAA esetén, mivel ennek a reakciónak viszonylag kicsi az energiaküszöbe. A gyorsneutronos NAA módszer fő előnye, hogy nem érzékeny a szóródott neutronokra, így folyamatos aktivációs analízisre és folyamat-szabályozásra is alkalmas a bányaiiparban.

Ezért ebben a munkában a CERT moderálatlan forrásával történő gyorsneutronos NAA módszer analitikai lehetőségeit vizsgáltuk. Az abszolút neutronfluxust aktivációs technikával, az  $^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$  reakció segítségével határoztuk meg. Ezt követően az Al, Fe, és Si kimutatási határát számítottuk ki moderálatlan forrással, szórásmentes környezetben.

## Eszközök és módszerek

A CERT eredeti kísérleti elrendezése paraffinba ágyazott 185 GBq aktivitású, 3,0 cm átmérőjű, 4,8 cm hosszúságú, henger alakú Am–Be neutronforrásból áll. A forrásérség  $1,29 \cdot 10^7$  n/s lehetővé tette a kísérleti elrendezés olyan módosítását, hogy gyorsneutron-besugárzást lehessen végrehajtani a paraffinmoderátor nélkül, szórásmen-

Csikai Gyulának ajánlva 75. születésnapja alkalmából 2005-ben, amely egyben a Fizika Éve is. Fordította Sükösd Csaba.