

# In-beam Mössbauer-spektroszkópia

Lázár Károly<sup>1</sup>, Belgya Tamás<sup>1</sup>, Csapó Edit<sup>2</sup>, Dékány Imre<sup>2,3</sup>, Hornok Viktória<sup>2</sup>,  
Stichleutner Sándor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium,  
1121 Budapest, Konkoly Thege M. út 29-33.

<sup>2</sup> MTA-SZTE Szupramolekuláris és Nanoszerkezetű Anyagok Kutatócsoport  
6720, Szeged, Dóm tér 8.

<sup>3</sup> SZTE Általános Orvostudományi Kar, Orvosi Vegytani Intézet  
6720, Szeged, Dóm tér 8.

## Bevezetés

Azokat a mérési módszereket nevezhetjük in-beam Mössbauer-spektroszkópiának, melyeknél a Mössbauer-forrás kialakításához és a mérés alatti fenntartásához valamilyen folytonos, egyidejű gerjesztő sugárzás is szükséges. Ez a besugárzás történhet nagyenergiájú ionokkal, deutériummal, valamilyen radioizotóppal, vagy neutronokkal. A különböző eljárások egyes változatai megjelentek már nem sokkal a Mössbauer-effektus felfedezése után. Az első eljárás alkalmasságát már 1967-ben demonstrálták. 36 MeV energiájú  $^{16}\text{O}^{5+}$  ionokkal sugároztak be  $^{57}\text{Fe}$  fóliát, a kilöködő gerjesztett vasmagokat implantálták fémekbe (Al, Au, Fe), és szigetelőbe (olivin). A módszer felvilágosítást adott arról, hogy az implantálódás után milyen környezetbe került a gerjesztett  $^{57}\text{Fe}$ . Ennek élettartama 140 ns, a méréshez folytonos besugárzás szükséges [1]. Az eljárás később jelentősen továbbfejlődött, a kísérleti elrendezésnek különböző újabb változatai jelentek meg és a vizsgált anyagok köre is számottevően bővült. Ugyancsak ezzel a módszerrel kapcsolatban jelent meg először az „in-beam Mössbauer-technika” kifejezés az 1980-as évek második felében [2]. Az implantált gerjesztett  $^{57}\text{Fe}$  rövid élettartama gyorsan lejátszódó folyamatok vizsgálatát teszi lehetővé, pl. a vas diffúzióját és elhelyezkedését vizsgálták félvezetőkben (pl. Si-ban) [3,4]. Az eljárás eredményeit több összefoglaló közlemény is tárgyalta [5,6]. A második változat, a deuteronos besugárzás nem terjedt el annyira, mint az előbbi.  $^{40}\text{K}$  magon javasolták a gerjesztett forrás létrehozását  $^{39}\text{K}(d,p)^{40}\text{K}$  reakcióval, a Mössbauer-effektus megjelenését demonstrálták [7]. Gerjesztett  $^{57}\text{Fe}$  állapot szintén előállítható deuteronos besugárzással, az  $^{56}\text{Fe}(d,p)^{57}\text{Fe}$  magreakció után szintén lehetett detektálni a Mössbauer-effektust [8].

A harmadik változat megvalósítására, az effektus előidézésére egy alkalmas sugárzó izotóppal, a megfelelő kísérleti feltételek létrejöttével az elmúlt évtizedben került sor.  $^{57}\text{Mn}$  magot lehet előállítani 80 MeV-es  $^{59}\text{Co}^{24+}$  nyaláb Be-ra történő ütköztetésével. A keletkező  $^{57}\text{Mn}$  elválasztható és újra gyorsítható, az implantálódó  $^{57}\text{Mn}$  magok energiája 1 GeV. A nagy energia nagy implantálási mélységet eredményez. Az  $^{57}\text{Mn}$  instabil izotóp, 1,45 perces felezési idővel  $\beta$ -bomlással gerjesztett  $^{57}\text{Fe}$ -sá alakul. Ezt a módszert is in-beam Mössbauer-spektroszkópiának nevezik [9]. Az  $^{57}\text{Mn}$

nyaláb előállítható másképp is, pl.  $\text{UC}_2$  1,4 GeV-es protonnyalábbal történő besugárzásával (az U hasításával), majd a keletkező magok lézeres ionizálásával [10]. A módszerrel különféle mátrixokba implantált  $^{57}\text{Mn}$ -ből keletkező  $^{57}\text{Fe}$  oxidációs állapotait lehetett meghatározni (pl.  $\text{KMnO}_4$ -ben [11], LiH-ben [12], és szilárd oxigénben is [13]).

A negyedik változatot, a gerjesztett Mössbauer forrásmag előállítását neutronsugárzással szintén már korán, 1965-ben megvalósították,  $^{40}\text{K}$  magot állítottak elő  $^{39}\text{K}$  besugárzásával [14]. Két évvel később az  $^{56}\text{Fe}(n,\gamma)^{57}\text{Fe}$  reakcióval állítottak elő gerjesztett forrást [15], a módszerrel pl. (Al, Fe) ötvözeteket is vizsgáltak [16]. Az eljárást ezután sokáig nem alkalmazták, csak a legutóbbi időben elevenítették fel ismét, a vas-szulfid módosulatait (pirit és markazit) vizsgálták [17]. Megkülönböztetésül az előbbi három eljárástól, a neutrongerjesztésen alapuló utóbbi módszert nevezik „neutron in-beam Mössbauer-spektroszkópiának”.

Az előzőekből az is kiderül, hogy az említett in-beam módszerekkel tulajdonképpen kevés fajta Mössbauer-magot állítottak elő, a  $^{40}\text{K}$ -ot, és a  $^{57}\text{Fe}$ -at. A  $^{40}\text{K}$  forrásmag előállításának eddig valóban egyedi módszere az in-beam eljárás. A  $^{57}\text{Fe}$  vizsgálatára viszont rendelkezésre állhat a konvencionális Mössbauer-spektroszkópia, amelyben a 270 napos felezési idejű  $^{57}\text{Co}$  forrás elektronbefogásos bomlása során keletkezik a gerjesztett  $^{57}\text{Fe}$ . Az in-beam eljárással előállított (implantált)  $^{57}\text{Fe}$  minták vizsgálatának nagy előnye az, hogy a módszer a konvencionális spektroszkópiához képest sokkal érzékenyebb, u.i. mindegyik implantált (és gerjesztett)  $^{57}\text{Fe}$  atom jelet ad, míg a konvencionális spektroszkópiában ez nem teljesül, továbbá a természetes izotóppösszetételű vas csak mintegy 2,7 %-ban tartalmaz  $^{57}\text{Fe}$  izotópot, így az in-beam eljárás érzékenysége sok nagyságrenddel meghaladja a konvencionális módszerét.

A neutron in-beam módszerrel kapcsolatban felmerül a kérdés – amennyiben egy gerjesztő neutronnyaláb rendelkezésre áll – hogy vajon találhatók-e olyan más atommagok is, amelyek neutronbesugárzásos aktiválásával újabb Mössbauer-források állíthatók elő.

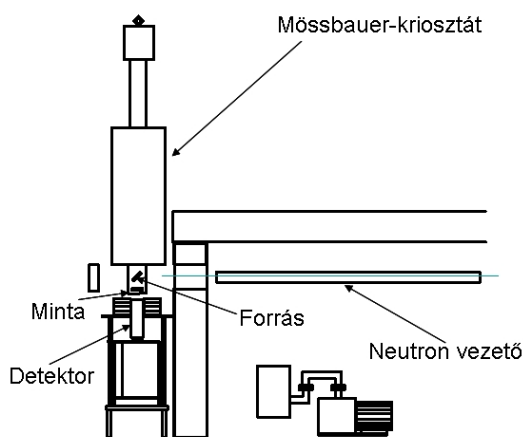
A neutronokkal kiváltott magreakciókban az atommag közvetlenül a neutronbefogás után kerül gerjesztett állapotba, így – alkalmas esetben – a Mössbauer-effektus kialakulásához szükséges nívók is azonnal gerjesztődnek (ez volt a helyzet a

$^{39}\text{K}$  és a  $^{56}\text{Fe}$  besugárzása esetén). Előfordulhat az is, hogy az  $(n,\gamma)$  magreakció első lépésében instabil atommag keletkezik, ami egy következő lépésben elbomlik. Ilyen esetekben az is előfordulhat, hogy az instabil mag Mössbauer-forrás lehet. Ez a második eset szigorúan véve már nem neutron in-beam spektroszkópia, hiszen a Mössbauer-nívó gerjesztése a besugárzáshoz képest késleltetéssel történik. Ugyanakkor van néhány rövid felezési idejű instabil mag, amelyeket érdemes lehet az in-beam technika kísérleti körülményei között előállítani (pl.  $^{193}\text{Ir}$ ,  $^{197}\text{Au}$  [18-20]). Az előzőekben leírtak még kiegészítendőek azzal, hogy a jó hatásfokú Mössbauer-mérésekhez a gerjesztő neutron nyaláb mellett még alacsony mérési hőmérsékletre is szükség van. U.i. eddig még nem említettük, hogy a Mössbauer-effektus létrejöttének valószínűsége erősen függ a hőmérséklettől (fordítottan arányos a hőmérséklet négyzetének exponenciálisával), azaz az alacsony mérési hőmérsékletek kedvezőek az effektus detektálhatósága szempontjából [21]. A Budapesti Neutron Centrumban rendelkezésre áll neutron nyaláb [22,23] és az in-beam Mössbauer mérőrendszer kiépítése ismét folyamatban van a 3-as számú neutronvezető átépítése miatt, így érdemes az előbbi kérdést - nevezetesen, hogy előállíthatók-e más Mössbauer-aktív magok közvetlen neutrongerjesztéssel - részletesebben megválaszolni. A jelen közlemény ehhez kíván hozzájárulni.

A következő részben a kísérleti eszközök, a rendelkezésre álló neutron nyaláb és berendezés néhány jellemző adatát mutatjuk be. A harmadik részben foglalkozunk a neutron nyalábban előállítható újabb Mössbauer-magok bemutatásával. A negyedik szakaszban néhány példát mutatunk a másodlagos, rövid felezési idejű instabil Mössbauer-magokkal végezhető mérésekre. Végezetül néhány előzetes mérés eredményéről is beszámolunk.

## Kísérleti körülmények

A kísérleti elrendezés vázlatát az 1. ábrán látható.



1. ábra: A neutron in-beam Mössbauer-mérőrendszer összeállításának vázlatát.

A kívánt aktivált Mössbauer-forrás a kiválasztott izotóp neutron nyalábbal történő besugárzása során alakul ki. A neutronok az ábrán jobbról, vízszintesen érkeznek a neutronvezetőben. A céltárgy a kriosztát alsó végén, egy Mössbauer mozgató egységhez kapcsolódó rúdon helyezkedik el. Közvetlenül a besugárzás hatására keletkező Mössbauer-forrás alatt helyezkedik el a vizsgálandó minta. A mintán áthaladó gamma-sugarak detektálásával alakul ki a

Mössbauer spektrum. Fontos megemlíteni, hogy mindegyik vizsgálandó elemhez/izotóphoz általában a kívánt céltárgyban dúsított céltárgyat kell használni, hogy kialakulhasson a megfelelő Mössbauer forrás.

Az aktiváló neutron nyaláb ún. „hideg” nyaláb ( $T_{\text{neutron}} \sim 22\text{ K}$  a forrásnál) [23]. Ez a hideg nyaláb azért előnyös, mert a neutronvezetők nagyobb hatásfokkal vezetnek tovább a mérőhelyre. A nyaláb hőmérséklete a neutronvezető falával kölcsönhatva fokozatosan nő, kb. 140 K átlaghőmérsékletű nyalábot kapunk, mire a mérőhelyre eljut ([23] és 5. ábra a [24]-ben). A „hideg” nyaláboknak további előnye az előbbieken említett ún. termikus neutron nyalábokhoz viszonyítva, hogy a neutronok és atommagok kölcsönhatásának hatáskeresztmetszete a neutronok sebességével fordított arányban nő a „hideg” neutronokkal történő aktiválás esetén. Az aktiváló nyaláb intenzitása jelenleg kb.  $10^8\text{ n cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$  a besugárandó céltárgy helyén. A kísérleti berendezés részletesebb leírása megtalálható a [25] közleményben, a mérőrendszer kalibrálásáról és a mérési körülmények kialakításával kapcsolatos mérésekről a [26] közlemény számol be.

## További ígéretes magok a neutron in-beam Mössbauer-spektroszkópiához

A kísérleti elrendezés vázlatának, valamint néhány fontos paraméternek a megismerése után konkrét számítások is végezhetők arra vonatkozóan, hogy várható-e, hogy a  $^{40}\text{K}$  és a  $^{57}\text{Fe}$  mellett további Mössbauer-aktív magok is kialakíthatók legyenek a megfelelő izotópok  $(n,\gamma)$  reakcióival. Az in-beam aktiválással kialakuló Mössbauer-effektus intenzitását az (1) képlettel lehet első közelítésben becsülni [25]. Az alsó  $s$  indexek a forrásra, az  $a$  indexek a céltárgyra vonatkoznak. Az egyenletben szereplő változók jelölését, és a közelítő számításokhoz használt értékeiket az 1. táblázat tünteti fel.

1. táblázat Az (1) egyenlet fizikai mennyiségeinek jelölése, és a számításokhoz használt értékeik

Változó	Érték	Leírás
$d_s, d_a$	0,001 $M_s$	A becsüléshez használt moláris tömeg
$M_s, M_a$		az elemek moláris tömege
$N_A$	$6 \cdot 10^{23}$	Avogadro-szám
$\Phi$	$10^9\text{ n cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$	A forrást érő neutron fluxus
$\sigma_{\text{elem}}$	változó *	gamma-sugárkeltési hatáskeresztmetszet
$f_s, f_a$	0,1	visszalökődésmentes hányad
$A_a$	1 $\text{cm}^2$	az abszorbens felülete
$\sigma_0$	$10^{-19}\text{ cm}$	Mössbauer elnyelési hatáskeresztmetszet
$\theta_a$	változó	az abszorbens izotópmag relatív gyakorisága
$\Delta\Omega_a$	0,994	az abszorbens geometriai tényezője
$\Delta\Omega_{\text{det}}$	0,0012	a detektor geometriai kitöltési tényezője
$E_{\text{det}}$	1	a detektor belső hatásfoka

$s$  - forrás  $a$  - abszorbens

\*  $\sigma_\gamma$  hatáskeresztmetszetek értékei [27]

$$R_{M-effect} = \frac{d_s}{M_s} N_A \Phi \sigma_{\gamma elem} f_s \left( 1 - \exp \left( - \frac{d_a}{M_a} \frac{N_A}{A_a} \sigma_0 \theta_a \right) \right) f_a \Delta \Omega_a \Delta \Omega_{det} \varepsilon_{det} \quad (1)$$

Az 1. táblázat értékeit használva az alábbi céltárgy izotópok mutatkoznak alkalmasnak neutronos in-beam Mössbauer-forrásnak (2. sz. táblázat).

2. táblázat *In-beam* Mössbauer-forrás kialakításához alkalmas izotópok

Célmagok	$E_\gamma$ (keV)	$\sigma_\gamma$ (barn)	Gyakoriság <sup>a</sup> (s <sup>-1</sup> )	Gyakoriság <sup>b</sup> (s <sup>-1</sup> )	Bizonytalanság <sup>c</sup> (%)
<sup>157</sup> Gd	79,00	4,010	28 757	717 180	0,009
<sup>158</sup> Gd	88,97	1,380	9 896	203 390	0,014
<sup>167</sup> Er	79,80	18,2	131	3 512	0,14
<sup>161</sup> Dy	80,66	13,3	95	9 576	0,32
<sup>177</sup> Hf	93,18	13,3	95	9 576	0,32
<sup>163</sup> Dy	73,39	1,37	10	986	1,01
<sup>179</sup> Hf	93,33	0,8	5,7	576	1,32
<sup>171</sup> Yb	78,74	0,67	4,8	482	1,45
<sup>154</sup> Gd	86,54	0,57	4,1	410	1,6
<sup>173</sup> Yb	76,47	0,4	2,9	288	1,9
<sup>160</sup> Dy	25,65	0,27	1,9	194	2,3
<sup>182</sup> W	46,48	0,192	1,4	138	2,7
<sup>182</sup> W	99,08	0,155	1,1	112	3,0
<sup>160</sup> Dy	74,57	0,086	0,62	62	4,0
<sup>56</sup> Fe	14,41	0,149	0,8	107	4,26
<sup>66</sup> Zn	93,31	0,0344	0,23	25	7,0
<sup>39</sup> K	29,83	1,38	0,069	994	144

<sup>a</sup> a Mössbauer-effektus gyakorisága

<sup>b</sup> a Mössbauer-gamma-sugarak gyakorisága

<sup>c</sup> a gyakoriságok hányadosának bizonytalansága százalékban

Az adatokból látható, hogy az előbbieken is említett <sup>39</sup>K és <sup>56</sup>Fe célmagok mellett számos egyéb célizotóp is azonosítható, amelyeken neutronaktiválással a fenti számítás alapján várhatóan előidézhető a Mössbauer-effektus, azaz ígéretes lehet a Mössbauer-spektroszkópia hatókörét ezekre a magokra is kiterjeszteni.

## Mérések rövid felezési idejű Mössbauer sugárforrásokkal

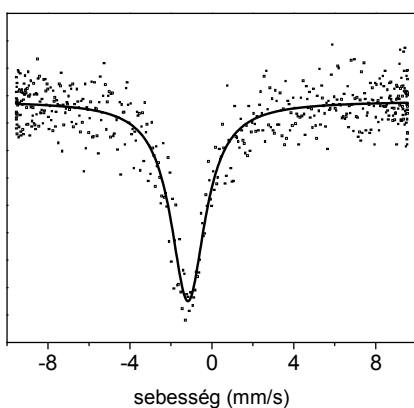
Az előző részben bemutatott esetekben a Mössbauer forrás közvetlenül a besugárzott atommagból a neutronbefogás hatására alakult ki. Neutron aktivációval előállíthatók rövid felezési idejű olyan atommagok is, amelyek későbbi bomlása során keletkezik Mössbauer-effektus kiváltására alkalmas magátmenet. Ezek közé tartozik pl. a <sup>197</sup>Pt forrás is. Ez a forrás a <sup>196</sup>Pt(n,γ)<sup>197</sup>Pt neutronbefogással állítható elő.

A keletkező <sup>197</sup>Pt β-bomlással, 19,9 órás felezési idővel alakul át <sup>197</sup>Au-nyá. Ennek a gerjesztett magnak a stabilizálódása során kibocsátott 77,3 keV energiájú γ-sugárzás alkalmas a Mössbauer-mérésekhez [28]. Hasonló a helyzet a <sup>192</sup>Os-mal. Neutronbefogás hatására <sup>193</sup>Os keletkezik belőle, amely 30,5 órás felezési idővel, β-befogással tovább alakul gerjesztett <sup>193</sup>Ir atommaggá. Ennek az alapállapotba történő átmenete során kibocsátott 73 keV-os sugárzás alkalmas a Mössbauer-effektus kiváltására. Jelentőséggel bír mind az arany, mind az irídium Mössbauer-spektroszkópiája pl. a nagydiszperzitású hordozós katalizátorok vizsgálata terén [29,30].

80 K-en elvégzett néhány előzetes <sup>197</sup>Au Mössbauer-méréssel demonstráltuk az 1. ábrán bemutatott berendezés használhatóságát. Egy 100 mg-os, 0,05 mm vastag és 10 mm átmérőjű, 94,6%-os dúsítású <sup>196</sup>Pt fólia 12 órás neutronbesugárzásával előállítottuk a kb. 1 GBq aktivitású <sup>197</sup>Pt Mössbauer-forrást. Félvezető detektorral kiválasztottuk a megfelelő 77,3 keV-os Mössbauer-átmenetet, majd elsőként felvettük egy kalibráló 25 mikron vastag aranyfólia

spektrumát. A mérés részletesebb leírása megtalálható az IKI honlapon [31]. A következő  $^{197}\text{Au}$  mérési sorozatban a nanodiszperz fémszemcsék méretváltoztatásának hatását demonstráltuk a Mössbauer-effektus gyakoriságára. 4 – 5 nm mérethatárig a szemcsék fémes jellegűek, ennél kisebb szemcséken kimutatható a felületi atomok tömbiekétől eltérő járuléka is, ezt 4 K-en végzett mérésekkel többen is igazolták [32,33]. A Mössbauer-effektus valószínűsége is erősen függ a szemcsemérettől [34].

Estünkben 80 K-es méréseket végeztünk nanoméretű monodiszperz Au szemcsékkel. A szemcséket  $\text{HAuCl}_4$  oldatból aminodextráns redukálással és a keletkező szemcsék egyidejű, a redukálószerrel történő stabilizálásával állítottuk elő a [35]-ben leírtakhoz hasonlóan. A szemcseméretet a redukálószer/ $\text{HAuCl}_4$  arány változtatásával szabályoztuk. Példaként a 2. ábrán bemutatjuk a 29 nm átmérőjű szemcsék spektrumát.



2. ábra: Az AuDex(1) minta 80K-es  $^{197}\text{Au}$  Mössbauer-spektruma

Az egyes mintákon a felvett spektrumokból hasonló kísérleti körülmények között határoztuk meg a fémes Au relatív intenzitását (3. táblázat).

3. táblázat A Mössbauer-effektus intenzitásának változása a különböző méretű Au szemcséken

Minta	Au tartalom (%)	átmérő (nm)	Rel. intenzitás (%)
fólia	100	$\infty$	1.03
AuDex(1)	75 *	29	0.730
AuDex(2)	51 *	20	0.684
AuOct **	80 *	4.5	$\sim 0$

Megjegyzések:

\* a minták fennmaradó komponense a stabilizálószer

\*\*  $\text{NaBH}_4$ -es redukció után oktántiollal funkcionizált minta

Mint látható, a 4.5 nm átmérőjű szemcsék mérete ahhoz már kicsi, hogy 80 K-en az adott elrendezés mellett tudjunk Mössbauer-spektrumot detektálni. A 4–6-szor nagyobb átmérőjű (16–36-szor nagyobb tömegű) szemcséken már jól detektálható az effektus, és megmutatkozik a relatív intenzitás függése is a szemcsemérettől.

## Összefoglalás

A közlemény áttekinti a Mössbauer-effektus keltésére alkalmas in-beam módszereket. Ezek egyikeként bemutatja a neutronaktiválós in-beam eljárást. Ismertet egy, az ilyen mérésekre alkalmas berendezést. Az in-beam neutronaktiválással előállítható Mössbauer források körének bővítésére vonatkozó előzetes számításaink eredményét is bemutatja, ezek alapján mintegy 15 újabb célmag bizonyulhat alkalmasnak ilyen típusú mérések végzésére. Ugyanezzel a mérési technikával rövid felezési idejű Mössbauer források is előállíthatók és alkalmazhatók, az  $^{197}\text{Au}$  magon 80 K-en végzett néhány előzetes mérés eredményét is tárgyalja a közlemény.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönettel tartoznak R.B. Firestone-nek (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA) a számítások elvégzésében nyújtott segítségéért és néhai Molnár Gábornak, a neutronaktivációs in-beam mérőállomás helyi kialakításának kezdeményezéséért. A közlemény az OTKA 81863 és a NAP VENEUS OMF00184/2006 projektek támogatásával jött létre.

## Irodalomjegyzék

- [1] G. D. Sprouse, G. M. Kalvius, S. S. Hanna: Mössbauer effect by recoil implantation through vacuum, *Phys. Rev. Lett.*, (1967) 18, 1041-1043.
- [2] Y. Yoshida: In-beam Mössbauer spectroscopy of atomic jump processes, *Hyperfine Interactions*, (1989) 47, 95-113.
- [3] R. Sielemann, Y. Yoshida: In-beam Mössbauer spectroscopy at heavy-ion accelerators, *Hyperfine Interactions*, (1991) 68, 119-130.
- [4] P. Schwalbach, S. Laubach, M. Hartick, E. Kankeleit, B. Keck, M. Menningen R. Sielemann: Diffusion and isomer shift of interstitial iron in silicon observed via in-beam Mössbauer spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.*, (1990) 64, 1274-1277.
- [5] G. Langouche: The Mössbauer search for Fe in Si, *Hyperfine Interactions*, (1992) 72, 217-228.
- [6] R. Sielemann: In-beam Mössbauer spectroscopy on isomer shift and diffusion of interstitial Fe, *Hyperfine Interactions*, (1993), 80, 1239-1255.
- [7] S.L. Ruby, R.E. Holland: Mössbauer effect in K40 using an accelerator, *Phys. Rev. Lett.*, (1965) 14, 591-593.
- [8] J. Christiansen, E. Recknagel, G. Weyer: Mössbauer effect by  $^{56}\text{Fe}(d,p)^{57}\text{Fe}$  reaction, *Phys. Lett.*, (1966) 20, 46-48.
- [9] Y. Kobayashi, Y. Yoshida, A. Yoshida, Y. Watanabe, K. Hayakawa, K. Yukihira, F. Shimura, F. Ambe: *Hyperfine Interactions*, (2000) 126, 417-420.

- [10] H.P. Gunnlaugsson, M. Fanciulli, M. Dietrich, K. Bharuth-Ram, R. Sielemann, G. Weyer, ISOLDE Collaboration: 57Fe Mössbauer study of radiation damage in ion-implanted Si, SiGe, and SiSn, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* (2002) 186, 55–60.
- [11] Y. Kobayashi, M.K. Kubo, Y. Yamada, T. Saito, H. Ueno, H. Ogawa, W. Sato, K. Yoneda, H. Watanabe, N. Imai, H. Miyoshi, K. Asahi: Valence states of 57Fe decayed from 57Mn implanted into KMnO<sub>4</sub>, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, (2003) 255, 403–406.
- [12] T. Nagatomo, Y. Kobayashi, M.K. Kubo, Y. Yamada, M. Mihara, W. Sato, J. Miyazaki, K. Mae, S. Sato, A. Kitagawa: In-beam Mössbauer spectroscopy of 57Mn implanted into lithium hydride, *Hyperfine Interactions*, DOI:10.1007/s10751-011-0487-1
- [13] Y. Kobayashi, H. Nonaka, J. Miyazaki, M. K. Kubo, H. Ueno, A. Yoshimi, H. Miyoshi, D. Kameda, K. Shimada, D. Nagae, K. Asahi, Y. Yamada: Reactions of 57Mn implanted into solid oxygen, *Hyperfine Interactions*, (2005) 166, 357–361.
- [14] D.W. Hafemeister, E. Brooks Shera: Mössbauer effect of the 29.4 keV neutron capture gamma ray of K40, *Phys. Rev. Lett.*, (1965) 14, 593–595.
- [15] W. G. Berger, J. Fink, F. E. Obershain: Observation of the Mössbauer effect with 57Fe following neutron capture in 56Fe, *Physics Letters A* (1967) 25, 466–468.
- [16] G. Czjzek, W. G. Berger: Hyperfine interactions at the final positions of 56Fe( $n,\gamma$ )57Fe recoil nuclei in bcc iron-aluminium alloys, *Phys. Rev. B* (1970) 1, 957–973.
- [17] Y. Kobayashi, Y. Yamada, Y. Tsuruoka, M. K. Kubo, H. Shoji, Y. Watanabe, T. Takayama, Y. Sakai, W. Sato, A. Shinohara, M. Segawa, H. Matsue: Neutron in-beam Mössbauer spectroscopy of iron disulfide at 298 and 78 K, *Hyperfine Interactions*, (2008) 187, 1135–1141.
- [18] R.V. Parish: <sup>197</sup>Au Mössbauer spectroscopy, in: *Mössbauer Spectroscopy Applied to Inorganic Chemistry*, Vol. 1. (Ed. G. J. Long) Plenum, 1984, 577–618.
- [19] J.D. Cashion: <sup>197</sup>Au Mössbauer studies – some successes and some future prospects, *Mössbauer Effect Reference and Data Journal*, (3003) 26, 169–170.
- [20] L. Stievano, S. Calogero, R. Psaro, F. Wagner: Advances in the application of Mössbauer spectroscopy with less-common isotopes for the characterisation of bimetallic supported nanoparticles: 193Ir Mössbauer spectroscopy, *Comments on Inorganic Chemistry*, (2001) 22, 275–292.
- [21] N. N. Greenwood, T. C. Gibb: *Mössbauer spectroscopy*, 1971 Chapman and Hall
- [22] L. Rosta: Cold neutron research facility at the Budapest Neutron Centre, *Appl Phys., A – Mater Sci Process* (2002) 74, S52–S54.
- [23] T. Belgya: Prompt gamma activation analysis at the Budapest Research Reactor, *Physics Procedia*, (2012) 31, 99–109.
- [24] T. Belgya, L. Szentmiklósi, Z. Kis, N. M. Nagy, J. Kónya: Measurement of 241Am ground state radiative neutron capture cross section with cold neutron beam, INDC(HUN)-0037, (2012) IAEA INDC – International Nuclear Data Committee, 18 pp.
- [25] T. Belgya, K. Lázár: New in-beam Mössbauer spectroscopy station at the Budapest Research Reactor, *Hyperfine Interactions*, (2006) 167, 875–879.
- [26] T. Belgya, K. Lázár: First experiments on a new in-beam Mössbauer spectroscopy station at the Budapest Research Reactor, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, (2008) 276, 269–272.
- [27] Z. Révay, R.B. Firestone, T. Belgya, G. L. Molnár: Prompt gamma-ray spectrum catalog, in: *Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams*, (ed. G. L. Molnár), Kluwer, Boston, (2004) 173–366.
- [28] <sup>197</sup>Au Mössbauer Spectroscopy, *Mössbauer Handbook* (Eds: J.G. Steevens et al.) Mössbauer Effect Data Center 2008.
- [29] L. Stievano, F. Wagner: Investigation of catalytic materials using 197Au Mössbauer spectroscopy, in: *Industrial Applications of the Mössbauer Effect*, AIP Conference Proceedings, (2005) 765, 3 – 12.
- [30] A. Goossens, M. W. J. Crajé, A. M. van der Kraan, A. Zwijnenburg, M. Makkee, J.A. Moulijn, R. J. H. Grisel, B. E. Nieuwenhuys, L.J. de Jongh: Characterisation of supported gold catalysts with 197Au Mössbauer effect spectroscopy, *Hyperfine Interactions*, (2002) 139/140, 59–66
- [31] In-beam Mössbauer spektroszkópia, [http://www.iki.kfki.hu/nuclear/instruments/ibms\\_hu.shtml](http://www.iki.kfki.hu/nuclear/instruments/ibms_hu.shtml) (letöltés: 2012. június)
- [32] L. Stievano, S. Santucci, L. Lozzi, S. Calogero, F.E. Wagner: 197Au Mössbauer study of gold particles obtained by evaporation of metallic gold on Mylar, *Journal of Non-Crystalline Solids*, (1998) 232–234, 644–649.
- [33] P.M. Paulus, A. Goossens, R.C. Thiel, G. Schmid, A.M. van der Kraan, L.J. de Jongh: The influence of size effects in Pt and Au nanoparticles studied by 197Au Mössbauer spectroscopy, *Hyperfine Interactions*, (2000) 126, 199–204.
- [34] Y. Kobayashi, M. Seto, S. Kitao, R. Haruki, T. Teranishi: 197Au Mössbauer study of Au nano-particles, *Hyperfine Interactions (C)* 5 (2002) 71–74.
- [35] A. Majzik, R. Patakfalvi, V. Hornok, I. Dékány: Growing and stability of gold nanoparticles and their functionalisation by cysteine, *Gold Bulletin* (2009) 42, 113–123.