

KESZTHELYI LAJOS SZEREPE A MÖSSBAUER-SPEKTROSKÓPIÁBAN

Bagyinka Csaba – Szegedi Biológiai Kutatóközpont
Nagy Dénes Lajos – Wigner Fizikai Kutatóközpont
Vincze Imre – Wigner Fizikai Kutatóközpont

E cikk szerzői (B.Cs., N.D.L. és V.I.) mindhárman *Keszthelyi Lajos* tanítványai, akik pályafutásuk egy-egy meghatározó szakaszában az ő munkatársai voltak. Utólag visszatekintve érdektelen, hogy szervezetenként éppen mikor, melyik intézetben dolgoztak, hiszen Lajos szinte valamennyi magyar Mössbauer-csoport spiritus rectora volt – még azoknak is, amelyeket közvetlenül soha nem irányított. N.D.L. 1966 januárjában kezdte meg diplomamunkája készítését Lajos csoportjában a 2022 januárjában elhunyt *Dézi István* témavezetésével. V.I. 1967 szeptemberétől alkalmazta kutatásaiban a Mössbauer-spektroszkópiát, míg B.Cs. 1970-től készítette szakdolgozatát Keszthelyi Lajos irányításával a KFKI-ban; 1972-től már, mint az SZBK tudományos segédmunkatársa

A szerzők köszönetüket fejezik ki *Kutnyánszky Anikónak*, a Wigner FK Könyvtár vezetőjének és munkatársainak azért, hogy az MTMT-t kiegészítették Keszthelyi Lajos néhány korábban nem ismert Mössbauer-spektroszkópiái közleményével.



Bagyinka Csaba (1949) biofizikus, az MTA doktora, a Szegedi Biológiai Kutatóközpont nyugalmazott tudományos tanácsadója. Fő kutatási területe a redox fehérjék szerkezetének és működésének vizsgálata különböző fizikai módszerekkel. Munkahelye az SZBK Biofizikai Intézete.



Nagy Dénes Lajos (1944) kísérleti szilárdtestfizikus, az MTA doktora, a Wigner Fizikai Kutatóközpont kutató professor emeritusa, az ELTE TTK Fizikai Intézet nyugalmazott egyetemi tanára. Fő kutatási területe anyagtudományi alkalmazások modellanyagainak vizsgálata magfizikai módszerekkel, elsősorban Mössbauer-spektroszkópiával. Első munkahelye a KFKI volt, és összesen mintegy hat évnyi tartós németországi távolléteitől eltekintve mindig a KFKI-ban, illetve annak utódszervezeteiben dolgozott.



Vincze Imre fizikus, az MTA rendes tagja, az ELTE egyetemi tanára, a Wigner FK emeritus kutató professzora. Kutatási területei: híg és koncentrált ötvözetek, Heusler-ötvözetek, fémközi vegyületek elektron- és mágneses szerkezete; hiperfinom tér szisztematika; amorf ötvözetek lokális atomi szerkezete, mágneses tulajdonságai; spinűvek; nanoszerkezetű anyagok mágneses tulajdonságai (előállításuk: párolgatás, mechanikai ötvöztetés és darálás, hőkezelés; kizsemcsés és nanokristályos ötvözetek, vékonyrétegek).

dolgozott a KFKI-ban, majd 1974-től az SZBK Mössbauer-laboratóriumában, amely 1977-ben megszűnt.

Keszthelyi Lajos nevével persze nem itt találkoztunk először. Két, 1959-ben, illetve 1964-ben megjelent alapvető könyvét (*Atomok és atomi részecskék* [MTMT 33544795],¹ *Szcintillációs számlálók* [MTMT 20439464]) már egyetemi hallgatóként is jól ismertük és rendszeresen forgattuk.

Lajos rendkívüli gondot fordított a fiatalok nevelésére. Csoportjában, sőt a KFKI Magfizikai Főosztályának teljes, általa vezetett Magfizika I Laboratóriumában – akkoriban ritka kivételként – minden fiattól elvárta az egyetemi doktorátus megszerzését. A Magfizika I hetente tartott szemináriumain a fiataloknak is rendszeresen kellett előadást tartaniuk. Ez szolgálhatott saját munkáról, de lehetett egy frissen olvasott cikk kritikai ismertetése is. Jó volt fiatal kutatónak lenni Keszthelyi Lajosnál.

Lajos tevékenysége a Mössbauer-spektroszkópiában oly mértékben szerteágazó (még akkor is, ha azt a hetvenes évek közepe után a kísérleti formában többé nem művelte), hogy meg sem kíséreljük annak minden részletében való bemutatását. Ehelyett néhány fontosabb témakört emelünk ki és írunk le részletesebben külön fejezetekben, míg a többit csak röviden említjük; esetenként el is hagyjuk.

A Mössbauer-effektus demonstrálása Magyarországon

Rudolf Mössbauer 1958-ban publikálta két közleményét a ¹⁹¹Ir 129 keV-es γ -fotonjai általa 1957-ben, doktori munkája keretében megfigyelt visszalökődés-mentes magrezonancia-abszorpciójáról [1, 2]; a felfedezést 1961-ben Nobel-díjjal ismerték el. A módszer valódi sikertörténete 1959 végén kezdődött, amikor *Pound* és *Rebka* [3], illetve *Schiff* és *Marshall* [4] (az első szerző eredeti nevén *Schiff* *János Pál*; ő is 2022-ben távozott az élők sorából) elsőként figyelték meg a Mössbauer-effektust az ⁵⁷Fe 14,4 keV-es γ -kvantumain.

¹Ebben a cikkben Keszthelyi Lajos saját publikációira MTMT-azonosítójuk megadásával hivatkozunk. Az MTMT nyilvános keresőfelületén (<https://m2.mtmt.hu/gui2/>) a „Közlemény” keresőablakba beírva az MTMT azonosítót, majd a „Keresés” mezőre kattintva megtaláljuk a kiadvány MTMT-ben rögzített bibliográfiai adatait. A hamis találatok kiszűrése végett célszerű a rövidebb azonosítókat bevezető 0 számjegyekkel 8 jegyűekre kiegészíteni.

Lajos azonnal felismerte az ^{57}Fe -rezonanciában rejlő alapkutatói és alkalmazási lehetőségeket. Elhatározta, hogy reprodukálja a Pound–Rebka-kísérletet; ebbéli szándékában Mössbauer is megerősítette. Visszaemlékezéseiben [MTMT 23116, MTMT 1912994, MTMT 1408490] részletesen leírja a terv megvalósításának buktatóit, majd azok megoldásait. Az első sikeres mérés 1960 novemberében történt a csoporthoz akkor csatlakozott Dézsi István radiokémikus közreműködésével. Ma már elborzadva olvassuk, hogy az effektus 1960. december 5-én, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat klubestjén lezajlott bemutatójáról titkosszolgálati jelentés készült. Az ^{57}Fe Mössbauer-effektusának megfigyeléséről és az azzal kapcsolatos fejlesztésekről Lajos és munkatársai 1961 és 1966 között további négy közleményben [MTMT 1408508, MTMT 22992, MTMT 23007, MTMT 33623690] számoltak be, amelyek célja elsősorban a módszer hazai megismertetése volt.

Lajos és munkatársai az első, nemzetközi visszhangot is kiváltó eredményt a Mössbauer-spektroszkópiában azzal érték el, hogy kimutatták a Mössbauer-effektust a ^{159}Tb 58 keV-es nívóján [MTMT 22952, MTMT 23011]. 1962-ben már működött a KFKI kutatóreaktora, ami lehetővé tette a sugárforrás előállítását dúsított $^{158}\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$ -ból kiindulva a $^{158}\text{Gd}(n,\gamma)^{159}\text{Gd}$ magreakció útján. Az így kapott, 18,5 órás felezési idejű ^{159}Gd forrás természetesen csak a telephelyen

tett lehetővé Mössbauer-méréseket, amelyeket az ^{57}Fe rezonanciával kalibráltak. Az 1965-ös cikkben [MTMT 23011] leírt, részletes vizsgálatokat is lehetővé tevő forrást a csoporthoz 1963 márciusában csatlakozott Molnár Béla készítette, aki 2014-ben bekövetkezett haláláig számos hazai és külföldi Mössbauer-csoport számára végzett hasonló feladatokat.

Lajos csoportja más Mössbauer-rezonanciákat is használt a hatvanas-hetvenes években. A ^{197}Au 77,3 keV-es nívójának gyakorlati jelentőségét az a tény adta, hogy az annak gerjesztéséhez szükséges 19,9 órás felezési idejű forrást úgy lehetett a $^{196}\text{Pt}(n,\gamma)^{197}\text{Pt}$ reakció segítségével reaktorban előállítani, hogy az semmilyen radiokémiai utómunkálattal nem tett szükségessé, sőt a lebomlott forrást újra fel lehetett aktíválni [5, MTMT 1397120].

Ugyancsak a KFKI reaktorában készültek 1967-ben dúsított ^{160}Gd -ból a $^{160}\text{Gd}(n,\gamma)^{161}\text{Gd}$ magreakció segítségével azok a 6,95 nap felezési idejű, 25,6 keV-es fotonokat kibocsájtó ^{161}Dy források, amelyekben a radioaktív ^{161}Dy magok végül is Gd_2O_3 mátrixban foglaltak helyet; a radiokémiai munka ebben az esetben is Molnár Béla teljesítménye volt [MTMT 15532].

A csoport ebben az időben $^{119\text{m}}\text{Sn}$ -forrásokat is használt, de azokat külső szállítóktól szereztek be.

1. ábra. Az 1965-ös *Physics Letters*-ben megjelent, nemzetközi ismertséget hozó cikk első oldala.

Volume 18, number 1 PHYSICS LETTERS 1 August 1965

MÖSSBAUER EFFECT STUDY OF PHASE TRANSITION IN ICE

I. DÉZSI, L. KESZTHELYI, B. MOLNÁR and L. PÓCS
Central Research Institute for Physics, Budapest, Hungary

Received 8 July 1965

In a recent publication [1] some results of Mössbauer-effect measurements on solidified solutions of various iron salts in water have been reported. The intensity of the effect at two temperatures, namely -191° and -71°C , indicated unusual behaviour, but different for different salts. Further investigations were performed to clear up these phenomena by a more thorough study of the temperature dependence. The experimental conditions were the same as in ref. 1. The solutions were measured upon their sudden solidifying, first at -191°C , then the temperature was gradually increased. The duration of a measurement was about 1.5 hr.

The temperature dependence of the Mössbauer pattern for $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_2$ salt is shown in fig. 1. The data of line width Γ , the intensity of the effect R and quadrupole splitting Δ are illustrated in fig. 2,

where the results of the measurements on FeCl_2 salt are shown too. These results exhibit very marked changes in the vicinity of -85°C : (1) Γ is broadening nearly up to this point after which it becomes narrower. (2) R is gradually diminishing and disappears at this point. (3) There is a jump in the value of Δ . (4) The development of the effect, after disappearing at -85° – -90°C , takes some time generally 0.5 to 1 hr (not shown). Similar results were obtained in solidified water solutions of FeSO_4 , $\text{Fe}(\text{NH}_4\text{SO}_4)_2$, FeCl_3 and in frozen heavy water solution of FeCl_2 .

These far-reaching changes may be explained by the phase transition in ice. A number of authors, in particular, König [2], Blackman and Lীগarten [3] studied the modifications and phase transitions in ice. According to these authors,

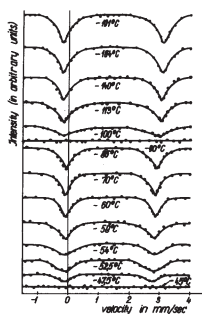


Fig. 1. Mössbauer patterns as a function of temperature for $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_2$ solution.

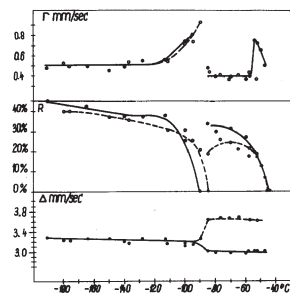
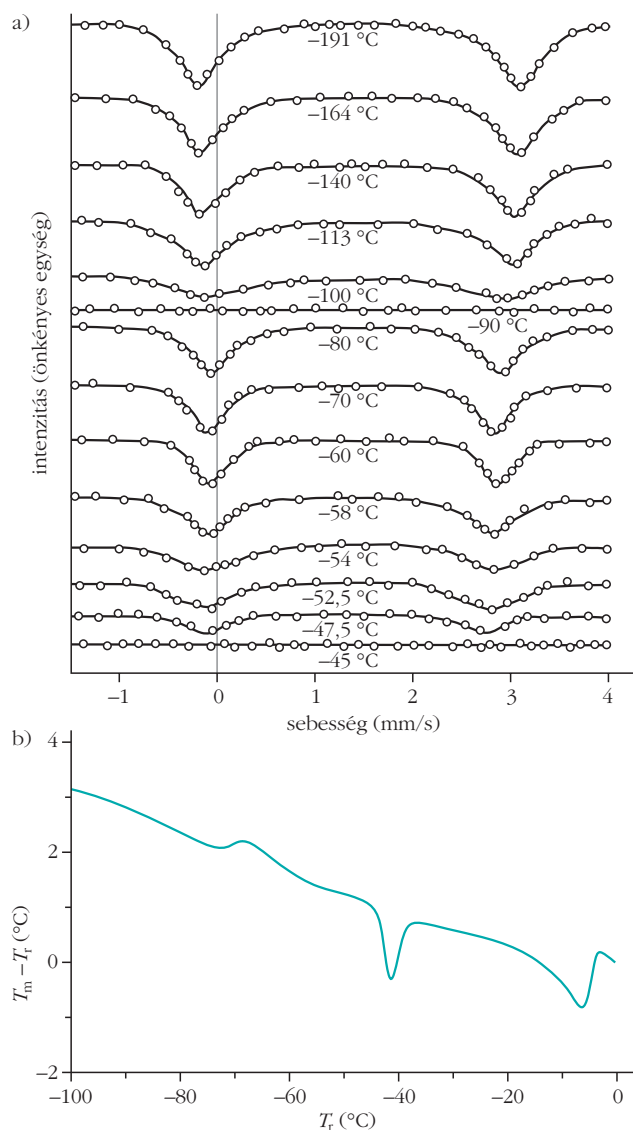


Fig. 2. Temperature dependence of Mössbauer effect intensity R , line width Γ and quadrupole splitting Δ for $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_2$ (solid line) and FeCl_2 (dashed line) solutions.

Lefagyasztott vizes oldatok

Mivel a Mössbauer-effektus csak szilárd fázisban figyelhető meg, azonnal felmerült a kérdés, hogy lehetne-e azt folyadékok (például oldatok) szerkezetének vizsgálatára is használni. 1963-ban Lajos azonnal felfigyelt arra, hogy Kerler és munkatársai [6] lefagyasztott oldatokon mértek Mössbauer-spektrumokat. A lehetőség ismeretében Dézsi István kezdeményezte, hogy a technikát vassók lefagyasztott vizes oldataira alkalmazzák. A téma ettől kezdve elsősorban István nevéhez kötődött, és igen hosszú időn át produkált rendkívül izgalmas eredményeket.

Az első, 1964 végén beküldött közleményükben [MTMT 23004] még csak a Kerler-módszer alkalmazásáról volt szó -191°C -ra hirtelen lefagyasztott mintákon, de az olvasónak már itt is feltűnhet, hogy a Mössbauer-effektus nagysága a felmelegítés során -70°C -on néhány esetben a kimutathatóság határa alá csökkent. 1965-ben jelent meg téma alapcikke [MTMT 23005], amely Lajos mellett Istvánt is egy csapásra világszerte ismertté tette (1. ábra). A szerzők itt figyelték meg és elemezték azt a 2.a ábrán bemutatott megfigyelésüket: a gyorslefagyasztott minták spektrumvonalai -100°C körül kiszélesednek, majd az effektus -90°C -on teljesen eltűnik. Tovább melegítve a mintát, újra megjelenik a Mössbauer-spektrum, és végleg csak -45°C körül tűnik el ismét. Az eredeti interpretáció részben helyes volt, később azonban részben revízióra szorult. A szerzők felismerték, hogy



2. ábra. $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_2$ lefagyasztott vizes oldata a) Mössbauer-spektrumainak és b) differenciális termoanalízisének hőmérsékletfüggése. T_m a minta, T_t pedig az inert referenciaanyag hőmérséklete.

a kiszélesedés oka a diffúzió [7], de a jelenséget tévesen hozták összefüggésbe a jég köbös-hexagonális fázisátalakulásával.

Ugyanez a tény megfigyelhetőnek bizonyult Sn és Dy sók esetében is [MTMT 15532]. Függetlenül az oldatba vitt sók, illetve a használt Mössbauer-átmenet megválasztásától, lassú visszahűtés esetén -90 °C környékén a spektrumokban semmilyen változás nem volt tapasztalható, de egy újabb gyorsfagyasztás után ismét fellépett a kiszélesedés és a spektrumok eltűnése.

1967 augusztusának végén Kaliforniában, Asilomarban *Hyperfine Structure and Nuclear Radiations* címmel tartottak konferenciát, amelyre Lajos is meghívást kapott. A konferencián többek között a lefagyasztott oldatokon megfigyelt jelenségekről is beszámolt [MTMT 22955]. Itt ismerkedett meg *John Cameronnal*, a kanadai McMaster University (Hamilton) professzorával, ami egy hosszabb együttműködés kezdetét jelentette. Lajos Ca-

meron meghívására 1969. január közepétől egy évre Hamiltonba utazott, és „vitte magával” a lefagyasztott oldatok témáját, amelyet ott aztán nemcsak Mössbauer-spektroszkópiával, de a perturbált γ - γ szögkorreláció (PAC) módszerével is [MTMT 1411593, MTMT 33563745] tanulmányoztak. Cameron 1970 második felében Lajos meghívására öt hónapot töltött a KFKI-ban.

A további, elsősorban Mössbauer-spektroszkópiával és differenciális termoanalízissel (DTA) végzett mérések egyre inkább arra utaltak, hogy a megfigyelt jelenség az ionok körül kialakuló üvegállapotú szférával kapcsolatos, amely lefagyasztáskor a kristályos szerkezetű jégtől elkülönül. Mivel a spektrumok végleges eltűnése mindig az eutektikus hőmérséklet közelében következett be, kézenfekvő volt, hogy az eutektikus, üvegállapotú zárványok már a gyorsfagyasztás során kialakultak [MTMT 3177443, MTMT 15403, MTMT 1411589, MTMT 33563570, MTMT 1411584, MTMT 1411585, MTMT 1411583]. A 2. b ábrán látható DTA-görbén -90 °C körül megfigyelhető exoterm csúcs a diffúziós folyamathoz, a -45 °C körüli endoterm csúcs az eutektikum, míg a -5 °C körüli endoterm csúcs a jég olvadásához rendelhető. Bár lefagyasztott oldatokat mind a mai napig számos csoport vizsgált és vizsgál Mössbauer-spektroszkópiával [8], ez az alapvető képünk azóta sem változott.

Mössbauer-mérések biológiai objektumokon

Keszthelyi Lajost még mielőtt 1972-ben a Szegedi Biológiai Kutatóközpontba (SZBK) került, érdekelte, hogyan lehetne a Mössbauer-effektust biológiai problémák megoldására felhasználni. Abban az időben a Mössbauer-méréseket kényelmesen és praktikusan az ^{57}Fe magon végzett mérések jelentették. A biológiában szerencsére a vas az egyik legjelentősebb szeretlen összetevő; sok helyen, sok biológiai molekulában (jellemzően fehérjékben) található meg. A problémát az okozta, hogy a vas százalékos előfordulása igen kicsiny. A mérésekhez ezért nagyon nagy mennyiségű biológiai anyagot kellett volna előállítani, és ennek feltételei Magyarországon akkor még nem álltak rendelkezésre, legalábbis az eddig még nem vizsgált Mössbauer-aktív anyagok esetében. A természetes vasat tartalmazó molekulákat viszont csak úgy lehetett volna ^{57}Fe -ben dúsítani, ha az élőlény teljes élete során csak ^{57}Fe tartalmú táptalajon nő, aminek viszont olyan anyagi vonzatai lettek volna, amelyeket nem lehetett vállalni. A vasatomok feldúsítása a már kitisztított biológiai anyagban pedig abban az időben szinte megoldhatatlan feladatnak tűnt, de még manapság sem egyszerű és megbízhatóan végrehajtható folyamat.

Ezért eleinte óvatos, csak diplomamunkákat eredményező próbálkozások voltak (különbözőképpen tartott állatokból származó, szárított vér és természetes vasat tartalmazó transzferrin molekula Mössbauer-

vizsgálata); olyan munka, amelyből tudományos publikáció született volna, sokáig nem keletkezett. Lajos szovjet kooperációban fehérje nélküli, többféleképpen módosított porfirinvázat is tanulmányozott.

A biológusokkal folytatott konzultáció során végül a biológiai anyagok és különféle vassók kölcsönhatását találta ígéretes témának, ami a lefagyasztott oldatok Mössbauer-vizsgálatához hasonló technikákat igényelt; ez ráadásul ismerős terület is volt. Ez a téma annyira ígéretesnek tűnt, hogy az SZBK Biofizikai Intézete egy Mössbauer-spektrométert is beszerzett.

Az első ilyen publikáció mesterséges membránok és különféle vassók kölcsönhatását vizsgálta [MTMT 1909839]. Lecitinmembrán jelenlétében a Fe^{3+} sók Mössbauer-spektruma jelentősen különbözött a membrán nélküli spektrumtól. Ezt a membrán közelében fellépő pH-változással magyarázták. A következő mérésekben az előző mérést továbbfejlesztve, néhány, a baktériumok vasfelvételében szerepet játszó molekula és a vas komplexét vizsgálta [MTMT 1090295, MTMT 1908635]. A mérési eredmények megmagyarázták, hogy a vas miképpen tud keresztüljutni a membránon a transzportermolekula segítségével, kihasználva a sejtmembránközeli tér pH-jának változását, ami $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ átalakulást indukál a komplexben.

Ezek a mérések azonban nem indokolták egy Mössbauer-spektrométer fenntartását és a drága, elbomló sugárforrás rendszeres vásárlását, ezért a Biofizikai Intézet két év múlva a készüléktől megszabadult, és ezzel itt a biológiai Mössbauer-mérések megszűntek. A későbbi szórványos, Keszthelyi Lajos támogatásával, de aktív közreműködése nélkül történő Mössbauer-kísérleteket a KFKI-val kooperációban végezték el.

Hiperfinom terek meghatározása a Mössbauer-szórás sugárzásának perturbált szögeloszlásából

Werner Meisel, a berlini (NDK) Zentralinstitut für Physikalische Chemie vezető kutatója a hetvenes évek elején figyelt fel arra a tényre, hogy a rozsdamentes acélból készült Mössbauer-abszorbensek és ^{57}Co Mössbauer-források vonalszélessége 1,5–2,5-szerese a természetes vonalszélességnek. Különféle illesztésekkel próbálta meg kideríteni, hogy ennek oka a hiperfinom kölcsönhatás melyik összetevője vagy összetevői eloszlásában keresendő.

Lajos Meissellel 1969-ben ismerkedett meg, és alighanem ekkor javasolhatta, hogy a kérdést ne csak Mössbauer-spektroszkópiával, hanem az időintegrális PAC módszerével is tanulmányozzák. Ilyen méréshez alapvetően egy gamma-kaszkádra van szükség; a hiperfinom kölcsönhatásra vonatkozó információt a detektorpár vízszintes síkjára merőleges irányú, felfelé és lefelé mutató külső mágneses térben felvett

szögkorrelációs képek szögelfordulás-különbségének és összenyomódásának (attenuációjának) mértéke tartalmazza. A kézenfekvő megoldás, nevezetesen az ^{57}Fe 136,5 keV-es nívójáról a 14,4 keV-es Mössbauer-nívóra, majd onnan az alapállapotra vezető kaszkádban kibocsátott 122,1 keV-es fotonok használata nem bizonyult elégségesnek [MTMT 33563510]. Van azonban egy másik lehetőség is: használható pusztán az alapállapot és a 14,4 keV-es nívó közötti átmenet, ha Mössbauer-szórást használunk, ismert irányban haladó rezonáns fotonnal gerjesztünk, majd a kibocsátott második fotont detektáljuk. E kísérlet elvégzésére érkezett Meisel Lajos meghívására 1976 januárjának közepén nyolc hónapra a KFKI-ba. A kísérlet sikerrel járt, és abból azt a következtetést vonták le [MTMT 1411579], hogy az egyvonalas spektrum kiszélesedésének fő oka a kvadrupólus kölcsönhatás, de nem zárható ki egy kis mágneses járulék sem.

A témát azonban nem ez az eredmény teszi érdekessé, hiszen – valljuk be – már akkor sem volt és később sem lett igazi jelentősége egy adott összetételű rozsdamentes acél hiperfinom téreloszlása elemzésének. Ilyen anyagokat a hetvenes évek közepétől sem abszorbensként, sem ^{57}Co forrásmátrixként senki nem használt. A valódi érték metodikai, de igen fontos. A Mössbauer-szórás ugyanis óhatatlanul Rayleigh-szórással is jár, és ha ennek szögeloszlása nincs korrekt módon figyelembe véve, az meghamisítja a mérés kiértékelését. Terjedelmi okok nem teszik lehetővé, hogy bemutassuk a Meisel–Keszthelyi-cikkben [MTMT 1411579] leírt korrekt eljárást, de mindenképpen ez az eljárás az említett vizsgálatok legfontosabb eredménye.

Egyiptomi cserépedények és üvegek

A hatvanas évek közepétől a hetvenes évek közepéig terjedő időszakban Lajos intenzív kapcsolatokat ápolt egyiptomi kutatókkal, elsősorban a kairói Al-Azhar Egyetem (AAE) munkatársaival. Ebben a fő együttműködő partner *Nabil A. Eissa*, az AAE néhai professzora volt, aki 1965-ben érkezett Magyarországra. Először Debrecenben, az Atomkiban neutronspektroszkópiával foglalkozott, majd 1966-ban Lajos Mössbauer-spektroszkópiái csoportjához csatlakozott, ahol elsősorban ferriteken és lefagyasztott oldatokon dolgozott. Ez utóbbi munkáin [MTMT 23018, MTMT 15532, MTMT 2433612] alapult az 1974-ben benyújtott, majd sikerrel megvédett *Néhány vastartalmú anyag tanulmányozása Mössbauer effektus segítségével* című nagydoktori értekezése is.

Kairóba hazatérve Nabilnak sikerült pénzt szereznie egy Mössbauer-laboratórium felállítására. A KFKI Műszaki Szakigazgatásának mérnökei 1968-tól korszerű Mössbauer-spektrométereket fejlesztettek azok kiegészítő egységeivel (kályhakkal, kriosztátokkal stb.) együtt, amelyekből közel ötven berendezésegyüttest

adtak el szerte a világon; sok ilyen ma is működik. Ezek közül az egyik elsőt kapta meg Nabil 1970 áprilisában. Sem a telepítés, sem az azt követő kutatómunka nem volt egyszerű feladat; ebben az időben ott még mindennaposak voltak a váratlan, több órás áramszünetek. Lajos azt javasolta Nabilnak, hogy elsősorban olyan témával foglalkozzék, amely Egyiptomhoz, az egyiptomi kulturális örökséghez kapcsolódik. Így indult el az ókori cserépedények és üvegek vizsgálata Mössbauer-spektroszkópiával [MTMT 33563584, MTMT 1411582, MTMT 3307207, MTMT 33563516], amely Nabil nevét széles körben tette ismertté.

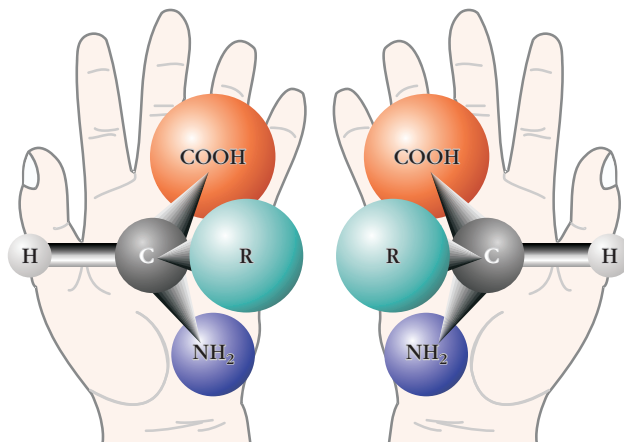
Cirkulárisan poláros γ -sugárzás abszorpciója L és D aminosavakban

1848-ban a 26 éves *Louis Pasteur* a kor divatos vizsgálati eszközét, a polarizált fényt használva felfedezte, hogy a szintetikus előállított borkősav két tükörszimmetrikus izomerből (azonos kémiai tulajdonságú, eltérő szerkezetű változatból) áll, amelyek a poláros fény síkját azonos mértékben, de ellenkező irányban forgatják. Pasteur azt is felismerte, hogy a szőlő erjedésekor keletkező borkősav csak az egyik izomert tartalmazza, optikailag tiszta, és hogy ez az élő szervezetek tulajdonsága.

Ezzel megszületett a sztereokémia, amely az atomok térbeli elhelyezkedését vizsgálja azonos összegképletű molekulák esetén. Királisnak nevezzük azokat a molekulákat, amelyek egymásnak tükörképei, de forgatással nem hozhatók fedésbe, mint azt a 3. ábra mutatja.

A fehérjemolekulák aminosavakból állnak, amelyek a glicin kivételével királisak (a glicin szimmetrikus szerkezetű, azaz akirális), de biológiailag aktív molekulákban csak a balkezes, L-változat fordul elő (L a latin *laevus* = bal szóból). A szénhidrátok, a nukleinsavak, a dezoxiribonukleinsavban (DNS) található cukor építőkövei pedig jobbkezesek (D a latin *dexter* = jobb szóból). Homokiralitásról akkor beszélünk, ha egy rendszerben a királis molekulák egymeműek; ilyenek az élet szempontjából létfontosságú biomolekulák: az élet homokirális. Laboratóriumi szintetizálás esetén azonos mennyiségben keletkezik jobb- és balkezes, kémiaiilag azonos tulajdonságú aminosav, mint például a híres 1953-as Miller–Urey-kísérletben [9]. Nincs megnyugtató magyarázat arra, hogy miképp alakult ki a biológiai homokiralitás, a tükörszimmetria megsértése. Felvetődött a gyenge kölcsönhatás szimmetriasértése, a longitudinálisan polarizált β -részecskék keltette cirkulárisan polarizált fékezési sugárzással való kölcsönhatás stb., mint az aszimmetria létrehozója.

A kérdés élénken foglalkoztatta Keszthelyi Lajost; a *Fizikai Szemlében* is többször írt erről [MTMT 3177430, MTMT 1408495]. 1974-ben a következő briliáns kísérletet javasolta és hajtotta végre a KFKI-ban e cikk egyik szerzőjével (V.I.) együtt annak vizsgálá-

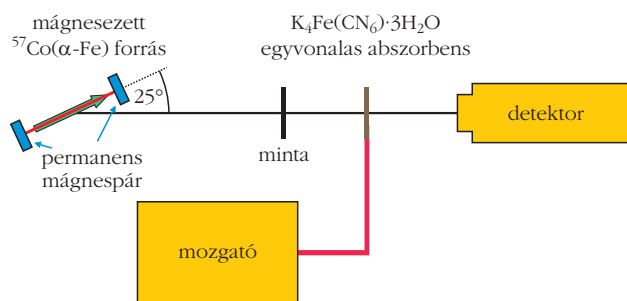


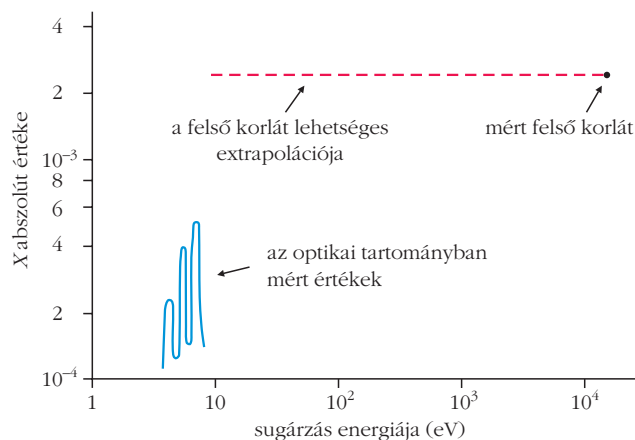
3. ábra. Királis molekulapár szemléltetése (forrás: Wikipédia).

tára, hogy a cirkulárisan polarizált kis energiájú fékezési sugárzás elnyelődése magyarázhatja-e a biomolekuláknál megfigyelt optikai aszimmetriát [MTMT 101576, MTMT 33563508].

Az ^{57}Co bomlása során keletkező ^{57}Fe mag 14,4 keV energiájú sugárzása azzal párhuzamos mágneses térben négy különböző energiájú vonalat eredményez, amelyek egyvonalas abszorbensű hagyományos Mössbauer-berendezéssel felbonthatók. Ezek a $3/2-1/2$ spinű átmenetnek megfelelően 100%-ban cirkulárisan polarizáltak (az első és a harmadik vonal jobbra, a második és a negyedik pedig balra). Ez lehetővé teszi, hogy ugyanazon a mintán egyidejűleg mérjük a jobb és bal polarizáltságú sugárzás abszorpcióját (kiküszöbölve a minta esetleges szennyezettsége és az elektronika bizonytalansága hatását). Az abszorpció ellentétes előjelű a megfelelő vonalparókra, ami a mérés belső ellenőrzését teszi lehetővé. Miután nem állt rendelkezésre legalább 5 T erősségű szupravezető mágnes (a szórt tér esetleges hatásának kiküszöbölése egyébként is gondot jelentett volna), a kísérlet során egy ≈ 100 mT erősségű permanens mágnes által telítéssel mágnesezett vasfóliába diffundáltatott ^{57}Co magokból létrejövő ^{57}Fe magok 33 T-ás \mathbf{B}_{hf} hiperfinom terét használták a vonalak felbontására. A vasfólia síkja 25° -os szöget zárt be az optikai tengellyel. A

4. ábra. Aminosavminták Mössbauer-mérése elliptikusan (közel cirkulárisan) poláros fotonokkal. A rezonáns γ -fotonjait a sötétkéssel jelölt permanens mágnespár által telítésbe mágnesezett, pirossal jelzett $^{57}\text{Co}(\alpha\text{-Fe})$ forrás bocsátja ki. Az egyvonalas $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ abszorbens a minta és a detektor között található.





5. ábra. Az X aszimmetriaparaméter abszolút értékei a sugárzás energiájának függvényében triptofánmolekula esetében.

mérési elrendezés hasonló volt a *Frauenfelder* és munkatársai által használtakéhoz [10].

A forrásból kilépő rezonáns fotonok áthaladtak a vizsgált mintán, majd egy egyvonalas $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$ abszorbensen, és ezután érték el a detektort (4. ábra). A 25° -os bedöntés ugyan csökkentette a cirkuláris polarizáltságot és valójában elliptikus polarizáltságot [10, 11] eredményezett, de a cirkuláris komponens részaránya (90%) a mérésből közvetlenül meghatározható volt. A méréseket L- és D-tirozinon, valamint L- és D-triptofánon végezték, és egyetlen esetben sem találtak a mérés hibáját meghaladó különbséget a jobb és bal polarizáltságú γ -sugárzás elnyelésében. A kétféle cirkuláris polarizáltságú fotonok abszorpciójának eltérését leíró X aszimmetriatényező abszolút értékeit mutatja triptofán esetére a 5. ábra a sugárzás energiájának függvényében, vázlatosan feltüntetve a korábbi, az optikai tartományban végzett mérések eredményeit is. Utóbbiak pontosságát Lajos és V.I. mérései közel egy nagyságrenddel meghaladták, még valószínűtlenebbé téve azt, hogy az élet aszimmetriáját polarizált fény okozta.

Ezeket az eredményeket Lajos több cikkben [MTMT 1090258, MTMT 1090341, MTMT 1090353] felhasználta a fékezési sugárzás lehetséges hatásának diszkussziójára novakitörés, meteoritokban talált vélhető aszimmetria stb. esetén.

A biológiai homokiralitás kérdése Mössbauer-mérések segítségével történő tisztázásának lehetőségére Lajos 1994-ben [MTMT 1090339, MTMT 1909353], majd 2003-ban [MTMT 1290486] ismét visszatért, felvetve az ^{57}Fe -n kívül más Mössbauer-izotópok használatának lehetőségét is.

Konferenciaszervező tevékenység

Elsősorban *Pál Lénárd* és Keszthelyi Lajos érdeme volt, hogy 1969 júniusában – az akkori „szocialista” országok között ritka kivételként – Magyarország valódi nemzetközi konferenciát szervezhetett Tihanyban a Möss-

bauer-spektroszkópia alkalmazásairól, amelynek résztvevői egyaránt verbuválódtak a „szocialista” országokból, az USA-ból, Nyugat-Európa szinte valamennyi országából, de – horribile dictu – még „Nyugat-Németországból”, sőt Nyugat-Berlinből is; ebben a tényben Lajos kiterjedt szakmai kapcsolatai fontos szerepet játszottak. 1989 szeptemberében ismét Magyarország rendezte a Mössbauer-spektroszkópikusok legnagyobb, kétévenkénti világkonferenciáját, az International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (ICAME) soron következő eseményét; a konferenciát Lajos nyitotta meg [MTMT 1411565].

Végszó

A magyar Mössbauer-spektroszkópikusok szervezete, a Magyar Mössbauer-laboratóriumok Hálózata 2014-ben történt megalakulása óta örökös tiszteletbeli elnökének tekintette Keszthelyi Lajost, aki a hálózat évenkénti előadói közül az első, 2014 novemberében részt vett és előadást is tartott. Emlékét hálatelt szívvel őrizzük.

Irodalom

A következő lista Keszthelyi Lajos Mössbauer-spektroszkópiái közleményeinek MTMT-azonosítóit tartalmazza megjelenési évek szerinti bontásban; használatuk módjának leírása a jelen cikk első oldalának lábjegyzetében található. **1961:** 1408508; **1962:** 22992; **1963:** 22952; **1964:** 23000; **1965:** 23004, 23005, 23003; **1966:** 23009, 23007, 23011, 33623690; **1967:** 23010, 23012, 23016; **1968:** 22955, 15532, 3177445, 15516, 23018, 2433612; **1969:** 15517; **1970:** 3177443; **1971:** 15403, 2184342, 33563745, 33563705, 1411589; **1972:** 3177440; **1973:** 1408506, 1411584, 1411585, 1411582, 1411583; **1974:** 1397120, 3307207, 33563516; **1975:** 1909839, 33563584, 33563570, 33563510, 101576, 33563508; **1977:** 1411579, 1908635; **1984:** 1090295; **1990:** 1411565; **1994:** 23116, 1290486; **1995:** 1909353; **2003:** 1290486, 1912994; **2006:** 1408490.

1. R. L. Mössbauer: Kernresonanzfluoreszenz von Gammastrahlung in Ir^{191} . *Z. Phys.* **151** (1958) 124–143.
2. R. L. Mössbauer: Kernresonanzabsorption von Gammastrahlung in Ir^{191} . *Naturwissenschaften* **45** (1958) 538–539.
3. R. V. Pound, G. A. Rebka, Jr.: Resonant absorption of the 14.4-keV γ ray from 0.10- μ sec Fe^{57} . *Phys. Rev. Lett.* **3** (1959) 554–556.
4. J. P. Schiffer, W. Marshall: Recoilless resonance absorption of gamma rays in Fe^{57} . *Phys. Rev. Lett.* **3** (1959) 556–557.
5. Blazsó T.: Mössbauer effektus a Cu_3Au ötvözetben. *KFKI Közl.* **12** (1964) 447–451.
6. W. Kerler, W. Neuwirth, E. Fluck, P. Kuhn, B. Zimmerman: Untersuchung komplexer und kovalenter Eisenverbindungen mit Hilfe des Mössbauer-Effekts von Fe^{57} . *Z. Phys.* **173** (1963) 321–346.
7. K. S. Singwi, A. Sjölander: Resonance Absorption of Nuclear Gamma Rays and the Dynamics of Atomic Motions. *Phys. Rev.* **120** (1960) 1093–1102.
8. A. Vértes, D. L. Nagy (editors): *Mössbauer spectroscopy of frozen solutions*. Akadémiai Kiadó, Budapest (1990).
9. S. L. Miller: A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions. *Science* **117** (1953) 528–529.
10. H. Frauenfelder, D. E. Nagle, R. D. Taylor, D. R. F. Cochran, W. M. Visscher: Elliptical Polarization of Fe^{57} Gamma Rays. *Phys. Rev.* **126** (1962) 1065–1075.
11. F. Tanczikó, L. Botyán, L. Deák, D. G. Merkel, D. L. Nagy: Sign determination of the hyperfine field by elliptically polarized Mössbauer source. *Hyperfine Interact.* **188** (2009) 79–84.