

Ez idő tájt kéthetente két napra Debrecenbe jártam előadást tartani. Így közelről láthattam, hogy Berényi Dénes milyen fáradhatatlanul dolgozik az ATOMKI-ért, a Kossuth Egyetemért, a Fizikai Társulatért és minden lehetséges jó ügyért.

A vidéki ATOMKI versenyre kelt a fővárosi KFKI-val azokon a területeken, amelyeken a szükséges eszközöket sikerült megteremteni Debrecenben. Ahol nem sikerült, ott együttműködő partnert kerestek Frankfurtból, Dublinból, Stockholmból, Tokióig. Sőt még az elméleti magfizikát is sikerült meggyökereztetni, ami később virágba szökkent.

Mindebben Berényi Dénesnek oroszlánrésze volt. Eközben szerkesztette a *Fizikai Szemlét* és a *Debreceni Szemlét*, ami szívügye mind a mai napig.

A béta-bomlás, az elektron-spektroszkópia, majd később az atomfizika, az atomi ütközések területén számos olyan fontos eredményt ért el, amelyeket a nemzetközi szakirodalomban számon tartanak. Sőt, még a hazában is.

Érdeemes emlékeztetni arra, hogy a határainkon kívül élő magyar kutatók ügyének gondozását az Akadémia Berényi Dénesre bízta.

Tudományos eredményeinek nemzetközi elismertségét és a hazai közügyekben végzett áldozatos munkáját honoráltuk, amikor megválasztottuk az MTA alelnökének.

Nekem személy szerint nagy szerencsém volt, hogy 1990-ben ő lett az Akadémia alelnöke, mert úgy adódott, hogy éppen akkor kellett átszerveznem a KFKI-t. És nagyon jó volt, hogy egy olyan tapasztalt fizikus volt az alelnök, mint Berényi Dénes. Volt egy súlyos probléma, mégpedig az, hogy a KFKI akkor egy félmilliárdos adósságot görgetett. Ez nagyon súlyos feszültségekhez, vitákhoz vezetett. Az elektronikusok azt mondták ne-

kem, hogy ha az utolsó 80 millió forintunkból alapítunk egy részvénytársaságot, akkor ők tudnak olyan megrendelést szerezni, amiből vissza lehet fizetni a fél milliárdot. Én hittem nekik és megalapítottuk az Rt.-t. A KFKI kutatói pedig naiv örültek neveztek és néha megakartak verni. Azokon az üléseken, amelyeken a KFKI ügye szerepelt, rendszerint Berényi Dénes elnökölt, aki higgadtságával le tudta szerelni a szélsőségeket. Hála a Jóistennek és az elektronikusok korrektségének, a fél milliárdot sikerült visszafizetni.

Berényi Dénesnek kiemelkedő szerepe volt abban, hogy a kutatóközpont helyén ma működő, önálló intézmények sikeres őrzői a KFKI hagyományainak és értékeinek.

A napokban megakadt a szemem *Galilei* nevén, aki éppen 400 évvel ezelőtt irányította az ég felé az első távcsövet, és erről eszembe jutott, hogy a Te neved is szerepel egy csillagászati katalógusban. A nagybolygókat a görögök az istenekről nevezték el: Mercur, Venus, Gaia, Mars, Jupiter stb.

Kisbolygót eddig több ezret fedeztek fel. Az 5694-es számúnak a Berényi Dénes nevet adták. Érdeemes egy pillantást vetni a katalógusban szereplő szomszédos sorszámú csillagok névadóira: Berényi Dénes magyar fizikus, *Henrik Ibsen* norvég író, *Arrhenius* svéd Nobel-díjas vegyész, *Emil Nolde* német expresszionista festő, *Homérosz* görög eposzteremtő, *Ljapunov* orosz matematikus.

Dénes, te megértetted, amit *József Attila* mondott: „dolgozni csak pontosan, szépen, ahogy a csillag megy az égen, úgy érdemes”.

Ehhez már csak annyit tehetek hozzá, hogy: Sic itur ad astra!

További jó munkát és jó egészséget kíván:

*Lovas István*

## A MÖSSBAUER-EFFEKTUS

Ha a Nap fényét – mely elsősorban a fotoszférából származik – spektroszkóppal vizsgáljuk, akkor az alapjában folytonos színekben bizonyos frekvenciáknál sötét elnyelési vonalakat figyelhetünk meg. Az elsőként *Wollaston*<sup>1</sup> által 1802-ben megfigyelt, majd *Fraunhofer*<sup>2</sup> által 1814-ben újra felfedezett és részletesen megvizsgált elnyelési vonalakat (mai nevükön Fraunhofer-vonalak) eredetére elsőként *Kirchhoff*<sup>3</sup>

Rudolf L. Mössbauer 1958-ban – éppen 50 éve – publikálta  $\gamma$ -kvantumok visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpciójának felfedezéséről beszámoló munkáit [1, 2]. A témáról bővebben is olvashatunk a *Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből* című könyvben (szerk.: Vértes Attila, Akadémiai Kiadó, 2008).

<sup>1</sup> William Hyde Wollaston (1766–1828) angol kémikus, illetve fizikus, a Pd és a Rh kémiai elemek felfedezője.

<sup>2</sup> Joseph von Fraunhofer (1787–1826) német fizikus.

<sup>3</sup> Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) német fizikus.

adott helyes magyarázatot 1859-ben: a Fraunhofer-vonalak azért keletkeznek, mert a Nap legkülső rétegében, a kromoszférában található különböző atomok a fotoszféra folytonos spektrumú sugárzásából elnyelik a vonaloknak megfelelő frekvenciájú elektromágneses sugárzást. Az elnyelt sugárzást azonban a kromoszféra gerjesztett állapotú atomjai rövid időn (~10<sup>-8</sup> s) belül újra kisugározzák: ha kizárólag a kromoszféra sugárzásának spektrumát vizsgáljuk (a fotoszféra fényének kitakarásával, vagy teljes napfogyatkozás alkalmával), akkor abban a Fraunhofer-féle vonaloknak megfelelő frekvenciáknál emissziós vonalakat figyelhetünk meg.

A kromoszféra atomjainak részvételével szakadatlan zajló abszorpció, majd azt követő emisszió jelensége az atomi rezonancia-fluoreszcencia egyik példája. Ennek során az abszorpció és az emisszió az atom

ugyanazon két energiaállapota között hoz létre (oda-vissza) átmenetet, s ezért a kisugárzott foton  $\epsilon = hf$  energiája, és ezzel egyidejűleg a kisugárzott elektromágneses sugárzás  $f$  frekvenciája rendre megegyezik az abszorpció során elnyelt foton energiájával, illetve az elnyelt elektromágneses sugárzás frekvenciájával. Lényegében ugyanezt a jelenséget földi körülmények között elsőként Wood<sup>4</sup> figyelte meg 1903-ban: hevített nátrium gőzét napfényel megvilágítva a Na-gőz fluoreszcens (emissziós) és abszorpciós spektrumát pontosan egybeesőnek találta [3].

Az atomi rezonancia-fluoreszcencia jelenségének létezése mindenekelőtt annak köszönhető, hogy az atomok lehetséges energiaállapotai diszkrét sokaságot alkotnak, más szóval kvantáltak. Miután világossá vált, hogy az atomokhoz hasonlóan az atomok magjának energiaállapotai is kvantáltak, és az atommagot elhagyó  $\gamma$ -sugárzás a mag két energiaállapota közötti (a magasabb energiájú állapotból az alacsonyabb energiájú állapotba történő) átmenet során keletkezik, az 1920-as években felmerült a kérdés, hogy vajon atommagok által kibocsátott monokromatikus  $\gamma$ -sugárzás segítségével – az atomi rezonancia-fluoreszcenciához hasonlóan – megvalósítható-e a *magrezonancia-fluoreszcencia* jelensége, amelynek során az atommag  $\gamma$ -sugárzás abszorpciója útján alapállapotból valamely gerjesztett állapotába kerül, majd rövid idő elteltével onnan alapállapotába visszatérve az elnyelt  $\gamma$ -sugárzás frekvenciájával megegyező frekvenciájú  $\gamma$ -sugárzást bocsát ki.

Bár kézenfekvőnek tűnt, hogy a magrezonancia-fluoreszcencia jelenségének léteznie kell, az 1950-es évet megelőzően a kimutatására irányuló kísérletek egyike sem szolgált erre meggyőző bizonyítékkal. A sikertelen próbálkozások közül legjelentősebb Kuhn<sup>5</sup> 1929-ben publikált munkája, amelyben Kuhn a tórium-C" ( $^{208}_{81}\text{Tl}$ )  $\beta$ -bomlása útján gerjesztett állapotban keletkező tórium-D ( $^{208}_{82}\text{Pb}$ )  $\gamma$ -sugárzásának természetes ólom és rádium-G (RaG,  $^{206}_{82}\text{Pb}$ ) dikloridjai (PbCl<sub>2</sub> és RaG Cl<sub>2</sub>) által történő szóródását vizsgálta [4]. Kuhn szóban forgó munkájának legfontosabb eredménye elméleti jellegű: rámutat, hogy a keresett magrezonancia-fluoreszcencia effektus kimutatására irányuló kísérletek sikertelen kimenetelében fontos szerepet játszik az emittens atom magjának – a  $\gamma$ -kvantum kibocsátásakor bekövetkező – visszalökődése. A kibocsátott  $\gamma$ -kvantum energiája ugyanis ennek következtében – az atommag visszalökődési energiájával – kisebb lesz, mint a megfelelő magátmenetre jellemző energia, s ezért nem lesz elegendő ahhoz, hogy az abszorbens atommagot (jelen esetben a természetes ólomban található  $^{208}_{82}\text{Pb}$ ) gerjessze. Munkájában Kuhn felhívja továbbá a figyelmet a forrás és az abszorbens hőmérsékletének jelentőségére: az emittens és abszorbens atomok hőmozgása a Doppler-hatás révén (a hőmérséklet emelkedésével növekvő mértékben) megnöveli az emittens atommagok által kibocsátott,

illetve az abszorbens atommagok által abszorbeált  $\gamma$ -sugárzás energiaspektrumának szélességét.

Az emittens atommag  $E_R$  visszalökődési energiája az energia- és impulzusmegmaradás törvénye alapján számítható:

$$E_R = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \approx \frac{E_0^2}{2Mc^2}, \quad (1)$$

ahol  $c$  a fénysebesség,  $M$  a visszalökődő atommag tömege,  $E_\gamma$  a kisugárzott  $\gamma$ -kvantum energiája,  $E_0$  pedig a megfelelő magátmenet energiája.

A Doppler-kiszélesedés  $D$  mértéke pedig a

$$D \approx \sqrt{2kTE_R} \quad (2)$$

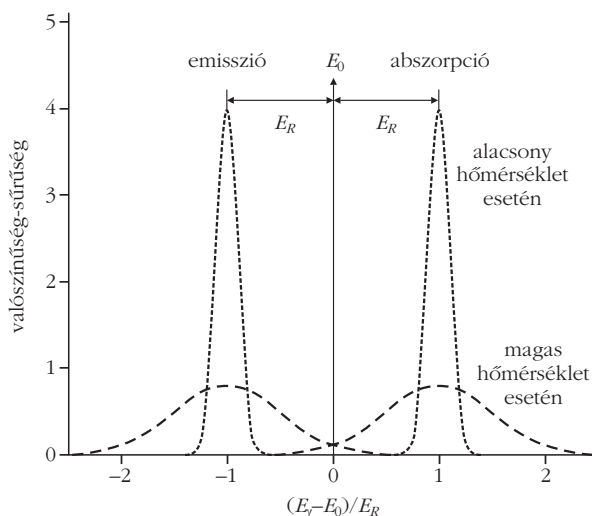
mennyiséggel becsülhető, ahol  $k$  a Boltzmann-állandó,  $T$  pedig a forrás, illetve az abszorbens hőmérséklete.

„Visszalökődés” az abszorbens atommag esetében is fellép, amikor az az emittens mag által kibocsátott  $\gamma$ -kvantumot elnyeli. Amíg tehát az emissziós spektrum az emittens mag visszalökődése miatt az energiategely mentén az  $E_R$  visszalökődési energiával balra (kisebb energiaértékek felé) tolódik, addig az abszorpciós spektrum ugyanilyen mértékben a nagyobb energiaértékek felé, jobbra tolódik el. Az emissziós és abszorpciós spektrumok centrumának távolsága tehát valójában  $2E_R$ , amint azt a 1. ábra mutatja.

A magrezonancia-fluoreszcencia bekövetkezésének valószínűsége az emissziós és az abszorpciós spektrum átfedő területével arányos (1. ábra). Kimutatható mértékű effektus az 1. ábra szerint akkor várható, ha a Doppler-kiszélesedés  $D$  mértéke a visszalökődési energia nagyságrendjébe esik, vagy annál nagyobb:  $D \geq E_R$ .

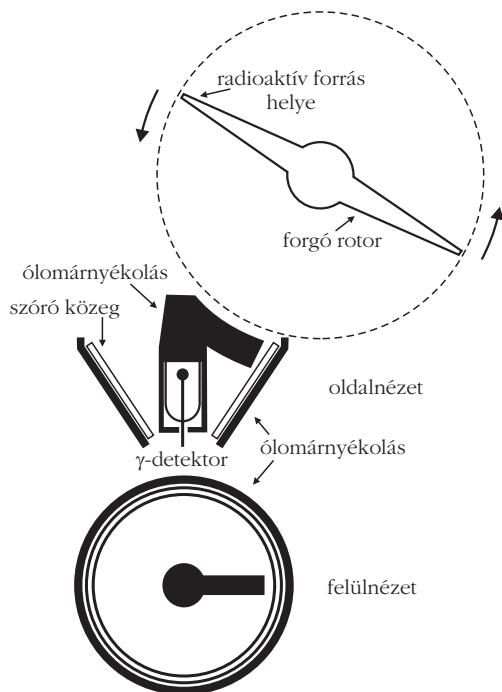
Mai ismereteink szerint [6] a Kuhn által vizsgált  $^{208}_{82}\text{Pb}$  izotóp legalacsonyabb energiájú gerjesztett álla-

1. ábra. A Doppler-kiszélesedés és a visszalökődés hatása rendre az emissziós és abszorpciós spektrumok szélességére és energiategely mentén való elhelyezkedésére gáz halmazállapotú forrás és abszorbens feltételezésével [5]. A jelöléseket illetően lásd az (1) egyenletet.



<sup>4</sup> Robert Williams Wood (1868–1955) amerikai fizikus.

<sup>5</sup> Werner Kuhn (1899–1963) svájci vegyész.



2. ábra. A magrezonancia-fluoreszcencia kimutatására Moon által alkalmazott berendezés sematikus rajza [7]. A csúcsain arannyal ( $^{197}\text{Au}$ ) bevont majd – besugárzás útján  $\sim 100$  mCi aktivitású  $^{198}\text{Au}$   $\beta$   $^{198}\text{Hg}$  radioaktív  $\gamma$ -forrássá – aktivált acél rotor a kísérlet közben vákuumban, pozitív irányban forog a lap síkjára merőleges tengely körül. A radioaktív forrás  $\gamma$ -sugárzása a szóró közeget (folyékony higany) elsősorban a forrás közeledése közben éri. A szórt sugárzást mérő  $\gamma$ -detektort ólom árnyékolás védi a forrásból származó közvetlen sugárzástól. A forrás tömegközéppontjának maximális sebessége a  $^{198}\text{Hg}$  izotópot alkalmazó sikeres kísérlet során  $\sim 6 \times 10^4$  cm/s volt.

potához  $E_0 \approx 2,6$  MeV  $\gamma$ -energia, és – az (1) formula alapján –  $E_R \approx 17,5$  eV visszalökései energia tartozik. A (2) kifejezés értelmében  $D \geq E_R$  akkor teljesül, ha  $2kT \geq E_R$ , ami jelen esetben  $T \geq 10^5$  K hőmérsékletű forrás és abszorbens esetén állhatna csak fenn. A Kuhn által alkalmazott szobahőmérsékletű forrás és abszorbens esetében  $D \approx E_R/20$ , azaz az emissziós és az abszorpciós spektrumok elenyésző mértékű átfedése miatt Kuhn kísérlete a magrezonancia-fluoreszcencia kimutatására eleve kudarcra volt ítélve.

A magrezonancia-fluoreszcencia jelenségének létezésére meggyőző kísérleti bizonyítékot elsőként Moon<sup>6</sup> szolgáltatott 1951-ben megjelent cikkében: a visszalökései hatását (az emissziós és abszorpciós spektrumok egymáshoz képest mért eltolódását) a forrás nagy ( $\sim 600$  m/s) sebességgel történő mozgása útján – a Doppler-hatás segítségével – sikerült elensúlyoznia [7]. A kísérletet Moon a  $\sim 2,7$  nap felezési idejű  $^{198}\text{Au}$   $\beta$ -bomlása útján keletkező  $^{198}\text{Hg}$  izotópot által kibocsátott  $0,411$  MeV energiájú  $\gamma$ -kvantumok és folyékony higany mint abszorbens, valamint a  $^{181}\text{Hf}_2\text{O}_3$  formájában alkalmazott –  $46$  nap felezési idejű  $^{181}\text{Hf}$   $\beta$ -bomlása útján keletkező  $^{181}\text{Ta}$  izotópot által kibocsátott  $0,48$  MeV energiájú  $\gamma$ -kvantumok és TaC (tantál-karbid) mint abszorbens felhasználásával végezte el. A kísérlet azonban csak a  $^{198}\text{Hg}$  izotópot alkal-

mazása esetében volt sikeres. A Moon által ez utóbbi esetben alkalmazott kísérleti berendezés vázlatos rajzát a 2. ábra mutatja.

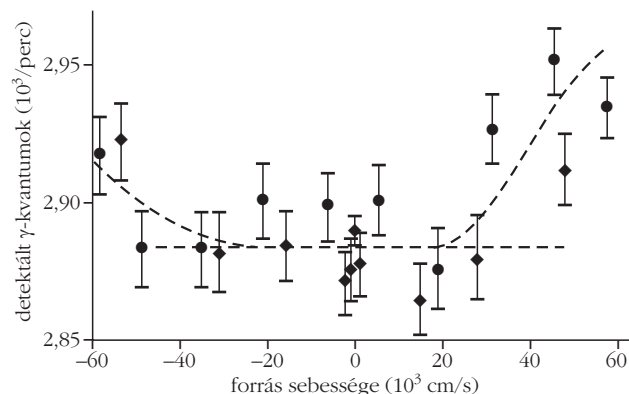
Moon elméleti számításai alapján a magrezonancia-fluoreszcencia effektus mértéke akkor maximális, ha a forrás

$$u_m = \frac{32E}{A} \text{ cm/s} \quad (3)$$

sebességgel közeledik a szóró közeghez, ahol  $E$  az alkalmazott  $\gamma$ -sugárzásnak megfelelő magátmenet eV egységekben mért energiája,  $A$  pedig a  $\gamma$ -sugárzást rezonáns módon szóró atommag tömegszáma. A fenti kifejezésnek megfelelően Moon a szórt  $\gamma$ -sugárzás mértékének maximumát a  $^{198}\text{Hg}$  izotópot segítségével végzett kísérletben  $u_m \approx 66554$  cm/s, a  $^{181}\text{Ta}$  izotópot segítségével végzett kísérletben pedig  $u_m \approx 84862$  cm/s sebesség mellett várta. A sikeresnek talált,  $^{198}\text{Hg}$  izotópot segítségével elvégzett kísérletek eredményeit a 3. ábra és az 1. táblázat foglalják össze.

Moon négy kísérletet tudott a  $^{198}\text{Hg}$  izotópot segítségével elvégezni. Egy alkalommal higany helyett rezonancia-fluoreszcencia bekövetkezése nem várható, így az ekkor kapott eredmények megfelelő összehasonlítási alapként szolgálnak ahhoz, hogy az effektus létezését a többi kísérlet eredménye alapján bizonyíthassuk. Higany szóró közeg alkalmazásával Moon két kísérletet végzett el a rotor pozitív irányú, és egyet a rotor negatív irányú forgása mellett (3. ábra, 1. táblázat). Az ötödik megkezdett kísérlet közben a rotor körül egy meghibásodás folytán a vákuum megszűnt, aminek következtében a rotor a vákuumkamra falának csapódott és a kísérleti berendezés tönkrement.

3. ábra. A szórt  $\gamma$ -sugárzás mértékének függése a forrás és a szóró közeg relatív sebességétől [7]. A sebességértékek a forrás átlagsebességét adják meg a számlálás 10 percére vonatkozóan. A  $\bullet$  jelek a rotor gyorsuló forgása közben, az  $\times$  jelek a rotor lassuló forgása közben detektált beütésszámokat jeleznek. A negatív sebességértékek ebben az esetben a 2. ábrán ábrázolt forgási iránnyal ellentétes, negatív irányú forgásra utalnak. A negatív sebességtartományban a beütésszámok emelkedése szintén a rotor szóró közeg felé haladó csúcsán elhelyezkedő  $^{198}\text{Hg}$  atommagok  $\gamma$ -sugárzásának köszönhető. A pozitív forgásirány esetével összehasonlítva, az effektus a negatív forgásirány esetében fennálló kedvezőtlenebb geometriai viszonyok miatt kisebb mértékű. A szaggatott vonal a mért adatok egy olyan lehetséges analízisét mutatja, ami összhangban van az elméleti számításokkal.



<sup>6</sup> Philip Burton Moon (1907–1994) angol fizikus.

1. táblázat

## A 3. ábrán bemutatott mérési eredmények értékelése útján kapott adatok

mérési körülmény	magrezonancia-fluoreszcencia effektus mértékét jellemző viszonzyszám
higany helyett réz mint szóró közeg (alapvonal meghatározása)	$0,998 \pm 0,005$
negatív forgásirány	$1,005 \pm 0,005$
pozitív forgásirány (1)	$1,007 \pm 0,008$
pozitív forgásirány (2)	$1,015 \pm 0,006$

A magrezonancia-fluoreszcencia effektus mértékét jellemző viszonzyszám jelen esetben nem más, mint a  $4 \times 10^4$  cm/s-nál nagyobb sebességű forrás esetében – adott időtartam alatt – mérhető beütésszám értékek átlagának és az e sebességnél kisebb sebességű forrás esetében mérhető beütésszám értékek átlagának hányadosa.

Vajon Moon  $^{198}_{80}\text{Hg}$  izotóppal elvégzett kísérletében az emissziós és az abszorpciós spektrumok egymáshoz képest való eltolódását mechanikai mozgás helyett a forrás egyszerű hevítésével is kompenzálni lehetett volna? A kérdésre újra az (1) és (2) kifejezések segítségével találhatjuk meg a választ. A  $^{198}_{80}\text{Hg}$  izotóp tömegét és a megfelelő magátmenet energiáját az (1) kifejezésbe behelyettesítve a  $^{198}_{80}\text{Hg}$  atommag visszalökődési energiájára  $E_R \approx 0,455$  eV adódik. Ha a  $^{198}_{80}\text{Hg}$  izotópot  $\beta$ -bomlás útján termelő  $^{198}_{79}\text{Au}$  forrást annak olvadáspontjára ( $T_{\text{olv.}} \approx 1337,33$  K) hevítjük, akkor a (2) kifejezés szerint a forrásban a Doppler-kiszélesedés mértéke  $D_{\text{forrás}} \approx 0,324$  eV. A 300 K hőmérsékletűnek feltételezett higany abszorbensben a Doppler-kiszélesedés ugyanakkor  $D_{\text{abszorbens}} \approx 0,153$  eV. Láthatjuk, hogy ebben az esetben a Doppler-kiszélesedés mértéke a visszalökődési energia nagyságrendjébe esik, ezért a magrezonancia-fluoreszcencia jelensége várhatóan a forrás hevítése útján is kimutatható.

Moon eredményeinek megjelenését követően Malmfors<sup>7</sup> valóban sikerrel végezte el ezt a kísérletet [8]. Malmfors az 1000–1100 °C hőmérsékletűre hevített  $^{198}_{79}\text{Au}$  forrásban képződő  $^{198}_{80}\text{Hg}$  atommagok által kibocsátott 0,411 MeV energiájú  $\gamma$ -sugárzás szórásának mértékét folyékony higany és ólom (mint összehasonlítási alap) szóró közegek esetében vizsgálta, és a várakozásokkal összhangban azt találta, hogy – azonos feltételek mellett – higany alkalmazása esetén a szórt  $\gamma$ -kvantumok száma rendre nagyobb, mint ólom szóró közeg esetén.

Egy évvel Malmfors cikkének megjelenését követően, 1953-ban elindult az eseményeknek egy olyan láncolata, ami végeredményben egy mindaddig elérhetetlenül nagy pontosságú, magrezonancia-fluoreszcencia jelenségére épülő (mag)spektroszkópiai mérési módszer (mai nevén a Mössbauer-spektroszkópia) felfedezéséhez vezetett: a Münchener Műszaki Egyetem fizika professzora, Maier-Leibnitz,<sup>8</sup> az egyetem egyik

diploma előtt álló 24 éves (azaz 1929-ben, a nevezetes Kuhn-féle cikk megjelenésének évében született) fizikus növendéke, bizonyos Mössbauer<sup>9</sup> számára diplomamunka gyanánt azt javasolta, hogy tanulmányozza a magrezonancia-fluoreszcencia effektust egy – ebből a szempontból – addig még nem vizsgált izotóp esetében a Malmfors által leírt módszer [8] alkalmazásával. Mivel az  $^{191}_{76}\text{Os}$   $\beta^-$ -bomlása útján keletkező  $^{191}_{77}\text{Ir}$  129 keV energiájú gerjesztett állapotának közepes élettartama nem volt még ismert, Mössbauer ezt az izotópot és az általa kibocsátott megfelelő – 129 keV energiájú kvantumokat tartalmazó –  $\gamma$ -sugárzást választotta kísérletei elvégzéséhez. Diplomamunkája keretében Mössbauer 12 proporcionális számlálót épített, amelyek együttesen ~5% valószínűséggel voltak képesek detektálni a 129 keV energiájú  $\gamma$ -kvantumokat. Ez ugyan a proporcionális számlálók között akkor világrekordnak számított, azonban elégtelen volt a keresett effektus kimutatásához.

1955 májusában, diplomamunkája befejezése után, Mössbauer lehetőséget kapott arra, hogy az  $^{191}_{77}\text{Ir}$  izotóppal kapcsolatos kísérleteket – doktori munkája keretében – Heidelbergben, az Orvosi Kutatások Max Planck Intézetének alegységéeként működő Fizikai Intézetben folytassa. A Münchener Műszaki Egyetemenél sokkal jobb kutatási – és anyagi – feltételeket biztosító Fizikai Intézetben Mössbauer hozzájutott a méréseihez megfelelő pontosságot biztosító elektronikai egységekhez, és a proporcionális detektorokat is hamar lecserélte a 129 keV energiájú  $\gamma$ -kvantumokat közel 100% valószínűséggel detektáló NaI(Tl) szcintillációs detektorra.

Malmfors és Moon kísérleteivel ellentétben azonban Mössbauer – a nagyobb mértékű effektus reményében – nem a szórt magrezonancia-fluoreszcencia sugárzás intenzitását mérte, hanem a magrezonancia-abszorpció mértékét vizsgálta: az  $^{191}_{76}\text{Os}$  izotópot tartalmazó, 65 mCi aktivitású forrás által kibocsátott 129 keV energiájú  $\gamma$ -kvantumok útjába egyszer természetes irídiumot, másszor – összehasonlítási alapként – platinát ( $_{78}\text{Pt}$ ) helyezett, és az ezen abszorbensek által átengedett  $\gamma$ -kvantumok számát detektálta a forrás hőmérsékletének függvényében.

Ahhoz, hogy az  $^{191}_{77}\text{Ir}$  atommag 129 keV energiájú állapotának közepes élettartamát meghatározza, Mössbauernek két különböző hőmérsékleten kellett méréseket végezni. Az (1) és (2) formulák alapján a szóban forgó magátmenet esetén az  $^{191}_{77}\text{Ir}$  mag visszalökődési energiája és a szobahőmérsékleti Doppler-kiszélesedés mértéke közelítőleg azonos ( $D \approx E_R \approx 0,05$  eV), ezért az emissziós és abszorpciós spektrumok átfedése már szobahőmérsékleten tartott forrás és abszorbens esetében is jól kimutatható mértékű magrezonancia-abszorpciót eredményez. A második mérési hőmérsékletet illetően Mössbauer választott előtt állt: vagy – Malmfors kísérleteihez hasonlóan – a forrás és/vagy abszorbens hevítése útján növeli a Doppler-kiszélesedés (és ezzel egyidejűleg a magre-

<sup>7</sup> Karl Gustav Malmfors (1919–1970) svéd fizikus.

<sup>8</sup> Heinz Maier-Leibnitz (1911–2000) német fizikus.

<sup>9</sup> Rudolf Ludwig Mössbauer (1929. január 31.) Nobel-díjas (1961) német fizikus.

zonancia-abszorpció) mértékét, vagy a forrás és/vagy abszorbens hűtése útján csökkenti azt. Mivel Mössbauer számára jóval egyszerűbbnek tűnt a forrás és abszorbens hűtése, mint hevítése, ezért úgy döntött, hogy – a Heidelbergben rendelkezésre álló folyékony levegő segítségével – a második mérést a szobahőmérsékletnél alacsonyabb, ~88 K hőmérsékletű forrás és abszorbens alkalmazása útján végzi el.

Az alacsony hőmérsékleti kísérletek azonban kezdetben értelmezhetetlen eredményekre vezettek, amelynek okát Mössbauer az abszorbens hűtésével együttjáró bizonyos zavaró effektusokban (pl. az abszorbens térfogatának változásában) vélte felfedezni. Ennek megfelelően a további mérések során csak a forrás hőmérsékletét csökkentette, az irídium és platina abszorbenseket pedig szobahőmérsékleten tartotta. Ily módon valóban sikerült kimutatnia a magrezonancia-abszorpció mértékének csökkenését a szobahőmérsékleten tartott forrás esetéhez képest,<sup>10</sup> és eredményei alapján az  $^{191}\text{Ir}$  atommag 129 keV energiájú állapotának közepes élettartamát  $(1,0_{-0,2}^{+0,4}) \times 10^{-10}$  s értékűnek találta [1].

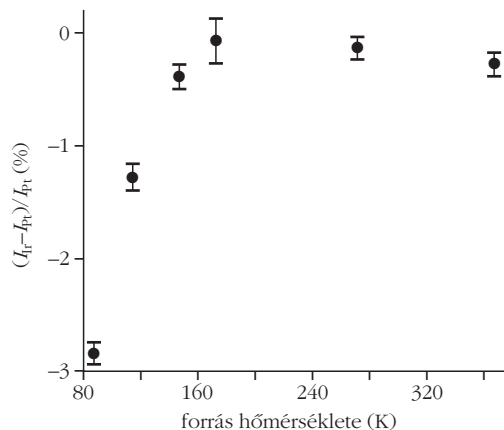
Bár doktori munkáját ezzel az eredménnyel akár le is zárhatta volna, Mössbauer utána kívánt még járni az abszorbens hűtésekor észlelt anomáliáknak is: az irídium és platina abszorbenseket ezúttal 88 K hőmérsékletűre hűtötte, és a korábbi kísérletekhez hasonlóan, a magrezonancia-abszorpció mértékét a forrás hőmérsékletének függvényében vizsgálta. Az ekkor kapott eredmények azonban gyökeresen ellentmondtak a várakozásoknak: az irídium abszorbens esetében a forrás hőmérsékletének csökkentése a magrezonancia-abszorpció mértékének növekedését – és nem csökkenését – vonta maga után (4. ábra).

A nem várt eredmény lehetséges okai után kutatva Mössbauer kikérte egy neves heidelbergi professzor, Jensen<sup>11</sup> véleményét, aki azonban „mindössze” azzal a tanáccsal szolgált, hogy „bármilyen különös is történik, annak benne kell lennie Lamb cikkében”. (Jensen professzornak a lényegét tekintve igaz volt: ennél jobb tanácsot talán nem is adhatott volna.) A szóban forgó, Lamb<sup>12</sup> által 1939-ben publikált cikket [9] Mössbauer ekkor már ismerte: egyike volt ez annak a négy publikációnak, amelyeket Maier-Leibnitz bocsátott a rendelkezésére még 1953-ban. Lamb munkájában nem  $\gamma$ -kvantumok, hanem neutronok szilárdtestekben történő abszorpciójával foglalkozik, és azt vizsgálja elméleti úton, hogy a szilárdtest rácsában kötött atomok (illetve atommagok) – rácsrezgések által befolyásolt – neutronabszorpció-spektruma mennyiben tér el az ugyanolyan atomokból álló, de gáz halmazállapotú anyag megfelelő spektrumától.

<sup>10</sup> A vizsgált magátmenet viszonylag nagy energiája miatt a – később felfedezett – visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpció valószínűsége a szobahőmérsékleten tartott irídium abszorbensben olyan alacsony mértékű, hogy azt Mössbauer ezekben a kísérletekben – még – nem észlelhette.

<sup>11</sup> Johannes Hans Daniel Jensen (1907–1973) Nobel-díjas (1963) német fizikus.

<sup>12</sup> Willis Eugene Lamb (1913) Nobel-díjas (1955) amerikai fizikus.



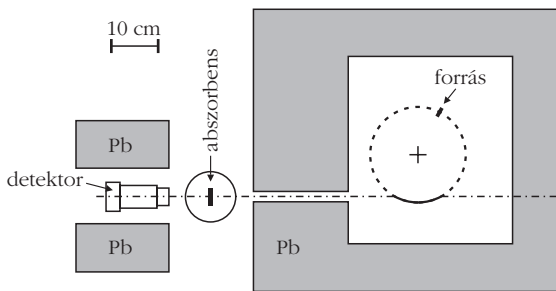
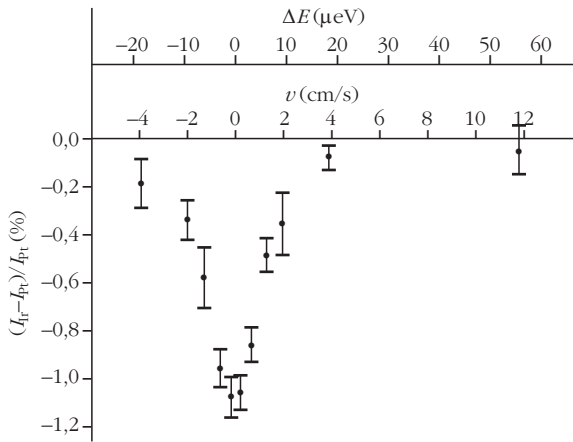
4. ábra. Az irídium és platina abszorbensek által átengedett sugárzás intenzitásának (rendre  $I_{\text{Ir}}$  és  $I_{\text{Pt}}$ ) a platina abszorbens által átengedett intenzitás nagyságához viszonyított relatív különbsége, mint a forrás hőmérsékletének a függvénye [1]. Az abszorbensek hőmérséklete a kísérlet során 88 K volt. Nyilvánvaló, hogy – a várakozásokkal ellentétben – a forrás hőmérsékletének csökkentése jelentős mértékben növeli az abszorpció mértékét az irídium abszorbens esetében.

Miután felfigyelt rá, hogy a Lamb által levezetett formulák az egymáshoz erősen kötött atomok határesetében egy csökkenő hőmérséklettel növekvő amplitúdójú, természetes vonalszélességgel bíró abszorpció csúcs megjelenését jósolták pontosan a megfelelő magátmenetre jellemző  $E_0$  energiánál, Mössbauer úgy döntött, hogy Lamb számításait  $\gamma$ -sugárzás abszorpciójának és emissziójának esetére alkalmazva megkísérli elméletileg is alátámasztani az abszorbens hűtésekor kapott váratlan mérési eredményeket. Mössbauer próbálkozásait teljes siker koronázta: sikerült kimutatnia, hogy a szilárdtestbe ágyazott atommagok esetében a  $\gamma$ -sugárzás magrezonancia-abszorpciója / -emissziója az esetek egy részében szükségszerűen az atommag visszalökődése nélkül megy végbe,<sup>13</sup> és ezen visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpció / -emisszió valószínűsége növekszik a hőmérséklet csökkenésével [1]. (A szóban forgó valószínűséget ma Mössbauer–Lamb-faktornak nevezik.)

Mössbauer ezzel, a kísérletei által jól alátámasztott elmélettel, lezárta doktori disszertációját, majd visszautazott Münchenbe azzal a céllal, hogy a neutronok fizikájával foglalkozzon Németország első (1957-ben a Müncheneri Műszaki Egyetemen telepített) kutató atomreaktorában. Három hónap elteltével, amikor a doktori munkája során elért eredményeket összefoglaló – német nyelvű – cikk [1] megjelent, Mössbauer rádöbben, hogy Heidelbergben nem végezte el a felfedezésével kapcsolatos legfontosabb kísérletet: nem mérte meg az irídium visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpció spektrumát. (Azaz, mai szóhasználatával élve, az irídium Mössbauer-spektru-

<sup>13</sup> Pontosabban a  $\gamma$ -kvantum kibocsátásával egyidejűleg – az impulzusmegmaradás tétele értelmében – szükségszerűen bekövetkező visszalökődés impulzusát nem egyedül a  $\gamma$ -kvantumot kibocsátó atommag, hanem a szilárdtest egésze veszi fel. Az  $E_0$  visszalökődési energia – ami az impulzust felvevő objektum tömegével fordítva arányos – ebben az esetben elhanyagolhatóan kis mértékű, gyakorlatilag zérus.





5. ábra. Az első Mössbauer-spektrum (fölül) és felvételének körülményei (alul) [2]. A forrás  $v$  sebessége és a  $\Delta E$  Doppler-eltolódás között a  $\Delta E = E_\gamma v/c$  összefüggés teremt kapcsolatot, ahol  $E_\gamma \approx 129$  keV,  $c$  pedig a fénysebesség. A mérés során mind a forrás, mind pedig az abszorbens hőmérséklete 88 K volt.

mát.) A visszalökődésmentes  $\gamma$ -emisszió és magrezonancia-abszorpció esetében ugyanis a megfelelő emissziós és abszorpciós spektrumok nem szenvednek sem – az 1. ábrán bemutatotthoz hasonló – eltolódást, sem Doppler-kiszélesedést, így az – egymással pontosan átfedő – emissziós, illetve abszorpciós csúcsok rendkívül keskenyek, mindössze a megfelelő magátmenet természetes vonalszélességével (az  $^{191}_{77}\text{Ir}$  129 keV energiájú átmenete esetén ez mindössze  $\Gamma \approx 10^{-5}$  eV) megegyező félértékszélességgel bírnak. Ez pedig lehetővé teszi a visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpció spektrumának rendkívüli (jelen esetben  $\Gamma/E_\gamma \leq 10^{-10}$ ) relatív pontossággal történő kísérleti meghatározását Moon módszerének [7] alkalmazásával, azaz a forrásnak az abszorbenshez képest való mozgatásával.

Mössbauer a rendkívüli eredménnyel kecsegtető kísérlet elvégzése érdekében visszasietett Heidelbergbe, ahol azonban pánikba esett, mikor rádöbbedt, hogy két legjelentősebb riválisa, Moon és Metzger<sup>14</sup> számára korábban másolatot küldött a doktori munkájának eredményeit bemutató – német nyelvű – cikkből. Lévén ugyanis, hogy mindketten kiváló ismerői a forrás mozgatása útján létrehozott magrezonancia-fluoreszcencia kísérleteknek, a Mössbauer által közölt eredmények alapján már könnyen felismerhették annak lehetőségét és jelentőségét, hogy a visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpció spektruma

a Doppler-kísérlet útján megmérhető. Moon professzor miatt Mössbauer kevésbé aggódott: meglehetősen biztos volt benne, hogy Moon – a svájci származású Metzgerrel ellentétben – nem tud németül. Azonban a Birminghami Egyetem Fizika Tanszékén a Moon professzorával szomszédos szobában ez idő tájt a német emigráns Peierls<sup>15</sup> dolgozott, Moon pedig azonnal hozzá fordult Mössbauer német nyelven közölt eredményeivel kapcsolatban. Peierls viszont, Mössbauer szerencséjére, úgy vélte, hogy az eredmények hibásak, így Moon nem kezdett hozzá a megfelelő Doppler-kísérlet elvégzéséhez. Metzger, bár felvette a kapcsolatot Mössbauerrel a számítások bizonyos részletkérdései kapcsán, szintén nem gondolt a Doppler-kísérlet elvégzésére. [10]

Moon kísérleteivel ellentétben, ahol a forrás – több száz m/s sebességgel történő – mozgatásának célja az – elektronvolt nagyságrendű –  $E_R$  visszalökődési energia kompenzálása volt, a visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpció spektrumának felvételekor a forrás mozgatásának célja az egymással szinte pontosan átfedő emissziós és abszorpciós spektrumok átfedésének, és ezzel a visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpció bekövetkezési valószínűségének csökkentése. Ehhez viszont a forrást elegendő az  $^{191}_{77}\text{Ir}$  természetes vonalszélességének megfelelő, mindössze cm/s nagyságrendű sebességgel mozgatni. Bár ekkora sebességek elérése könnyen kivitelezhető egy forgótányér segítségével, a különböző sebességértékek beállításához szükséges fogaskerekeket a Heidelbergben rendelkezésre álló mechanikai műhely csak több hetes munkával tudta volna kellő számban legyártani. Mössbauer ezért a forrást mozgató berendezést végül heidelbergi játékboltokból beszerzett fogaskerekek segítségével állította össze.

A Mössbauer által alkalmazott mérési elrendezés, és a segítségével sikeresen felvett spektrum – az első Mössbauer-spektrum – az 5. ábrán látható: az emissziós spektrumnak az abszorpciós spektrumhoz képest történő eltolódása – történjen az akár a kisebb, akár a nagyobb energiaértékek felé – a visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpció valószínűségének csökkenéséhez vezet. Az így kialakuló (Lorentz-görbe alakú) abszorpciós csúcs félértékszélessége az elmélet szerint a  $\Gamma$  természetes vonalszélesség duplája, így a mért spektrum Mössbauer számára lehetővé tette, hogy az  $^{191}_{77}\text{Ir}$  129 keV energiájú gerjesztett állapotának  $\Gamma$  természetes vonalszélességét és  $\tau = \hbar/\Gamma$  közepes élettartamát közvetlenül is meghatározza.

Amellett, hogy e kísérletével Mössbauer egy új eljárást fedezett fel az alacsony gerjesztési energiájú magállapotok természetes vonalszélességének és közepes élettartamának meghatározására, egyben egy rendkívüli pontosságú spektroszkópiai anyagvizsgálati módszer alapjait is megteremtette. Az atommag valamely energiaállapotának energiája ugyanis az atommag kémiai környezetének is függvénye, így utóbbi – közvetve – az atommag energiaállapotainak energiájában

<sup>14</sup> Franz R. Metzger (1918) svájci származású amerikai fizikus.

<sup>15</sup> Sir Rudolf Ernst Peierls (1907–1995) német származású brit fizikus.

bekövetkező változások vizsgálata útján is tanulmányozható. Erre pedig a Mössbauer által felfedezett módszer – rendkívüli energiafelbontása miatt – igen nagy pontossággal nyújt lehetőséget.

Miután tisztában volt felfedezésének jelentőségével és az annak révén megnyíló új lehetőségekkel, eredményét Mössbauer lehetőleg „feltűnés nélkül” szeretne volna publikálni annak érdekében, hogy még riválisai előtt felderíthesse és kiaknázhassa a módszerben rejlő további lehetőségeket. Korábbi témavezetőjétől – ennek kapcsán – azt a tanácsot kapta, hogy eredményeit a *Naturwissenschaften* című folyóiratban, a Max Planck Társaság hetente megjelenő tudományos kiadványában közölje.<sup>16</sup> A német nyelven írt, alig egy hasáb terjedelmű cikk [2] 1958-as megjelenését követően azonban már az első héten 260-an jelezték Mössbauer számára, hogy szeretnének másolatot kapni a publikációból. Így bár Mössbauer az irídiummal elvégzett sikeres kísérletet követően azonnal lépéseket tett annak irányába, hogy módszerét az alkalmazások szempontjából legígéretesebb tulajdonságokkal rendelkező atommag, az 57-es tömegszámú vas atommag esetére is alkalmazza, az első <sup>57</sup>Fe Mössbauer-spektrum felvétele már mások nevéhez fűződik.  $\gamma$ -kvantumok visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpciójára, illetve -emissziójára azonban az 1960-ban megjelenő kapcsolódó publikációk jelentős része már „Mössbauer-effektus” megjelöléssel utal.

Mössbauer módszere (mai nevén a Mössbauer-spektroszkópia) a kutatók előtt egy olyan új ablakot nyitott a természetre, amelyen keresztül egyes atommagok alacsony energiájú állapotainak tanulmányozására azelőtt soha nem látott részletességgel nyílt lehetőség. Az a

<sup>16</sup> Az 1913-ban alapított *Naturwissenschaften* egyike a legnagyobb presztízsű német nyelvű tudományos folyóiratoknak.

kísérlet pedig, amelynek során a <sup>57</sup>Fe Mössbauer-spektroszkópia módszerének segítségével Pound<sup>17</sup> és Rebka<sup>18</sup> sikerrel mutatta ki az Einstein-féle általános relativitáselmélet által megjósolt gravitációs vöröseltolódás jelenségét [11], világszerte felhívta a figyelmet a Mössbauer által felfedezett effektus jelentőségére.

Mössbauer a róla elnevezett effektus felfedezéséért 1961-ben elnyerte a fizikai Nobel-díjat: „for his researches concerning the resonance absorption of gamma radiation and his discovery in this connection of the effect which bears his name” [12].

## Irodalom

1. Mössbauer R. L.: Kernresonanzfluoreszenz von Gammastrahlung in Ir<sup>191</sup>. *Zeitschrift für Physik* 151 (1958) 124.
2. Mössbauer R. L.: Kernresonanzabsorption von Gammastrahlung in Ir<sup>191</sup>. *Die Naturwissenschaften* 45 (1958) 538.
3. Wood R. W., Moore J. H.: The Fluorescence and Absorption Spectra of Sodium Vapor. *Philosophical Magazine* 6 (1903) 362.
4. Kuhn W.: Scattering of Thorium C<sup>γ</sup> radiation by Radium G and Ordinary Lead. *Philosophical Magazine* 8 (1929) 625.
5. Kuzmann E., Homonnay Z., Nagy S., Nomura K.: Mössbauer spectroscopy. In: Vértes A., Nagy S. Klencsár Z. (szerk.): *Handbook of Nuclear Chemistry*. Vol. 3, 109–187., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003.
6. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
7. Moon P. B.: Resonant Nuclear Scattering of Gamma-Rays: Theory and Preliminary Experiments. *Proceedings of the Physical Society A* 64 (1951) 76.
8. Malmfors K. G.: Nuclear resonance scattering of gamma-rays. *Arkiv för Fysik* 6/5 (1952) 49.
9. Lamb, W. E. Jr.: Capture of Neutrons by Atoms in a Crystal. *Physical Review* 55 (1939) 190.
10. Mössbauer R. L.: The discovery of the Mössbauer effect. *Hyperfine Interactions* 126 (2000) 1.
11. Pound R. V., Rebka G. A. Jr.: Apparent weight of photons. *Physical Review Letters* 4 (1960) 337.
12. [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1961/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1961/)

<sup>17</sup> Robert Vivian Pound (1919) kanadai születésű amerikai fizikus.

<sup>18</sup> Glen Anderson Rebka amerikai fizikus.

## SZUPERNEHÉZ ELEMEK

Szupernehéz atommagok szintéziséhez és vizsgálatához alapvető érdekek fűződnek mind az atommagfizika, mind a kémia oldaláról. A legnehezebb atommagok olyan laboratóriumot alkotnak, ahol nagyon erős Coulomb-taszítás körülményei között vizsgálhatók a magszerkezet, bomlás és reakciók sajátosságai. Extrém körülmények között alaposabban megismerhetjük a magerők sajátosságait és teljesen váratlan jelenségek is felbukkanhatnak. Nyitott kérdés, hogy milyen rendszám- és tömegszámhatárig létezhetnek atommagok kötött állapotban.

Az egyszerű folyadékcseppmodellre alapozott számítások szerint az atommagok stabilitása a  $Z = 100$ – $106$  rendszám körül megszűnik, mivel a protonok közötti hosszú hatótávolságú Coulomb-taszítás ekkor felülmúlja a nukleonok közötti vonzó, rövid hatótávolságú erős kölcsönhatást. Extra stabilitás származ-

hat azonban héjlezárodások miatt. A makroszkopikus-mikroszkopikus modellek (pl. a véges hatótávolságú cseppmodell, a FRDM [1])  $Z = 114$ ,  $N = 184$ -nál (a)héjlezárodásokat jeleznek. Önkonzisztens átlagtérszámítások is végezhetők, mind nem-relativisztikus, mind relativisztikus közelítésben. A legtöbb nem-relativisztikus átlagtérszámítás  $Z = 124$  vagy  $126$ ,  $N = 184$  esetében, a relativisztikus  $Z = 120$ ,  $N = 172$  körül széles tartományban héjstabilizációs hatást jelez.

## A transzurán és szupernehéz elemek előállítás

A <sup>93</sup>Np-tól a <sup>98</sup>Cf-ig terjedő transzurán elemek, valamint a <sup>101</sup>Md felfedezése (n,γ), illetve (α,n) reakciók segítségével történt. A vizsgálatokhoz nehéz aktinida céltárgyakat használtak, amelyek többségét reaktor-

Fényes Tibor  
MTA ATOMKI, Debrecen