

Mössbauer-effektus vizsgálata(MOS)

KORSZERŰ VIZSGÁLATI MÓDSZEREK LABORATÓRIUM

EÖTVÖS LÓRÁND TUDOMÁNYEGYETEM

TERMÉSZET TUDOMÁNYI SZAK

FIZIKA BSC

SZERZŐ

MÁTHÉ MARCELL TIBOR

MÉRŐTÁRSAK

KATONA DÁVID, OLÁR ALEY

MARCH 20, 2018

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés

Az alábbi jegyzőkönyvben a ELTE-Korszerű vizsgálati módszerek laboratórium keretein belül elvégzett Mössbauer-effektus vizsgálata(MOS) című mérés eredményeit és az abból levont következtetéseimet mutatom be. A mérést a -1.111, Korecz László Laboratóriumban végeztük a mérő társaimmal. Az effektus részletes elméleti tárgyalása a <http://atomfizika.elte.hu/kvml/docs/korszeruosszefuzott.pdf> címen a 12. fejezetben a 251. oldaltól megtalálható.

1.1 Mérés célja

Különböző anyagok Mössbauer- spektrumának felvétele (lágvas,rozsdamentes acél, nátrium-nitroprusszid). Illetve ezek által becslést adni a mag mágneses nyomatéknak a mágneses térrel való kölcsönhatás okozta felhasadásra illetve a kvadрупól momentumnak az inhomogén elektromágneses térrel való kölcsönhatásából eredő felhasadásra, majd ezeket összehasonlítani az elméletekből eredő mennyiségekkel.

1.2 Mérés rövid leírása

A mérés során a fotonokat kibocsátó forrást egy hangfalra rögzítve mozgattuk állandó gyorsulás mellett (a sebesség idő grafikon egy háromszög jel) és így a Doppler-effektust felhasználva végig lehet pásztázni a kívánt energia tartományt.

$$\Delta E = E_{\gamma} \frac{v}{c}$$

A bejövő fotonokat egy proporcionális számlálóval detektáljuk majd ezt a jelet különböző szűrőkön átvezetve egy sokcsatornás analizátorra vezetjük. Forrásnak egy ^{57}Co -et használunk mely atomok egy elektron befogás után ^{57}Fe -vé alakulnak át, amik a legerjesztődés során 91% valószínűséggel egy 14,4KeV energiájú fotont bocsát ki. Ez az energia a mérés szemszögéből is hasznos mert proporcionális kamra hatáskeresztmetszete a kisebb energiájú fotonokra nagyobb, illetve a létrejövő ^{57}Fe élettartama viszonylag nagy emiatt a kibocsátott foton vonalszélessége kicsi. A már fentebb említett szűrőkkel a berendezést erre az energiára állíthatjuk rá, ezt a mérés kezdeténél nekünk kellett beállítani. Eztán a lágvas,rozsdamentes acél és a nátrium-nitroprusszid mintákat kellett a berendezésbe behelyezni, a bejövő jeleket egy DOS-os szoftverrel elemeztük. Mivel a hangfal sebessége egy perióduson belül kétszer ugyan az így az ábrákon is minden esetben párosával jelentek meg a csúcsok, ezt a szoftver segítségével félbe hajtva tovább lehetett csökkenteni a jel-zaj

arányt, majd ugyanezzel a programmal különböző fajtájú Lorentz-görbéket illesztettünk az adatokra.

2 Mért adatok és kiértékelésük

2.1 Kalibrálás

Mivel a forrás sebessége a hangszóróra erősítve lineárisan változik az időben így a csatornaszám-energia függvény is lineáris lesz, továbbá mivel csak energiakülönbségeket tudunk ezzel a módszerrel mérni így a kalibráláshoz elegendő a kalibrációs egyenes meredeksége. Felhasználva hogy a lágyvas két legtávolabbi csúcsának távolsága Doppler-sebességben $d_v = 10.6162$ (Ez irodalmi érték). A mérés alapján pedig a két csúcs távolsága $d_{cs} = 366.61 \pm 0.957$. Ezeket az adatokat felhasználva a meredekség.

$$m = E \frac{d_v}{d_{cs} c} = (1.3909 \pm 0.00036) \cdot 10^{-9} eV$$

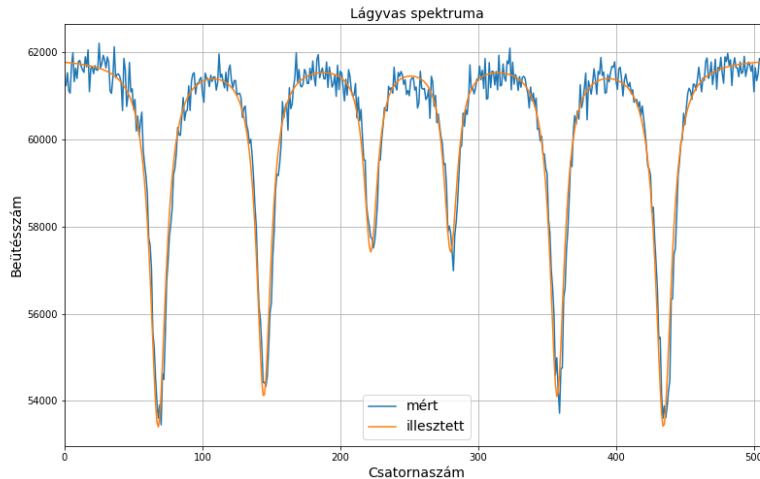


Figure 1: A kalibráláshoz a két legszélső csúcs csatornaszámbeli különbségét használjuk fel

2.2 A rozsdamentes acél és a nátrium-nitroprusszid minta izomér eltolódása a lágyvashoz képest

A magnak az elektronfelhővel való elektrosztatikus kölcsönhatása kis mértékben módosítja a mag energiaszintjeit ezt nevezik izomér eltolódásnak, az eltolódás mértéke jellemezhető a Mössbauer-spektrummal és így meghatározható

a minta szerkezete és anyagösszetétele. Az effektus során a rozsdamentes acélban és nátrium-nitroprusszidban megtalálható vasmagok eltolódását vetjük össze a lágyvaséval. Érdeemes megjegyezni hogy izomér eltolódást sok egyéb effektus is okozhat(pl gravitációs tér, kristályszerkezeti elváltozások) de ezekről itt most eltekintünk. A lágyvashoz tartozó spektrumban a Zeeman-felhasadás miatt 6 db csúcs van (Lsd.: 1 ábra) a nívók eredeti helyét úgy becsülhetjük meg hogy az illesztés során olyan Lorentz-görbét illesztünk az adatokra, hogy a csúcsokat párokba rendezzük majd egy (felhasadás nélküli) helyhez képest tekintjük a távolságukat, így minden görbe párhoz 4 db adat tartozik ezek az alábbi táblázatban láthatóak A három felhasadás nélküli

alapvonal (B)	61883 ± 22
1. amplitúdó (A_1)	8418 ± 83
1. csúcs helye (felhasadás nélkül) ($x_{0,1}$)	252.09 ± 0.07
1. csúcs szélessége (Γ_1)	13.86 ± 0.2
1. felhasadás (S_1)	366.6 ± 0.1
2. amplitúdó (A_2)	7682 ± 86
2. csúcs helye (felhasadás nélkül) ($x_{0,2}$)	251.86 ± 0.07
2. csúcs szélessége (Γ_2)	12.62 ± 0.2
2. felhasadás (S_2)	212.8 ± 0.1
3. amplitúdó (A_3)	4327 ± 89
3. csúcs helye (felhasadás nélkül) ($x_{0,3}$)	252.06 ± 0.12
3. csúcs szélessége (Γ_3)	11.89 ± 0.4
3. felhasadás (S_3)	57.92 ± 0.24

Table 1: A lágyvas spektrumára illesztett Lorentz görbék paraméterei

csúcs helyet kiátlagolva kaphatjuk meg a Zeemann-effektus nélküli helyet.

$$IS_{lv} = \frac{252.09 + 251.86 + 252.06}{3} = 252.0 \pm 0.05$$

ezután ugyan ezt az illesztési módszert elvégezve az acélra és nátrium-nitroprusszidra

Rozsdamentes acél	
alapvonal (B)	1170.6 ± 1.7
amplitúdó (A)	342.0 ± 13.3
csúcs helye (x_0)	247.65 ± 0.32
szélesség (Γ)	16.57 ± 0.96
Nitroprusszid-nátrium	
alapvonal (B)	2631.9 ± 2.6
amplitúdó (A)	364.5 ± 18.7
csúcs helye (felhasadás nélkül) (x_0)	242.55 ± 0.25
szélesség (Γ)	9.86 ± 0.73
felhasadás (S)	59.51 ± 0.50

Table 2: A spektrumra illesztett Lorentz görbék paraméterei

Az illesztések alapján az izomér eltolódásokra különböző anyagokra:

lágyvas	252 ± 0.05	0
rozsdamentes acél	247.65 ± 0.32	$(6.0504 \pm 0.0094) \cdot 10^{-9} eV$
nátrium-nitroprusszid	242.55 ± 0.25	$(1.3144 \pm 0.0017) \cdot 10^{-8} eV$

ahol táblázat harmadik sorában az első alfejezetben használt kalibrációs meredekséget használtuk fel

$$\Delta E_{ab} = m * (SI_a - SI_b)$$

módon.

2.3 A gerjesztett állapot élettartama és a minták vastagsága

A jegyzetben a 261.o (12.11) képlete alapján a valódi vonalszélesség

$$\frac{\Gamma_{mert}}{\Gamma} = 2 + \frac{\omega_i T_A + T_F}{4} - \frac{(\omega_i T_A + T_F)^2}{625}$$

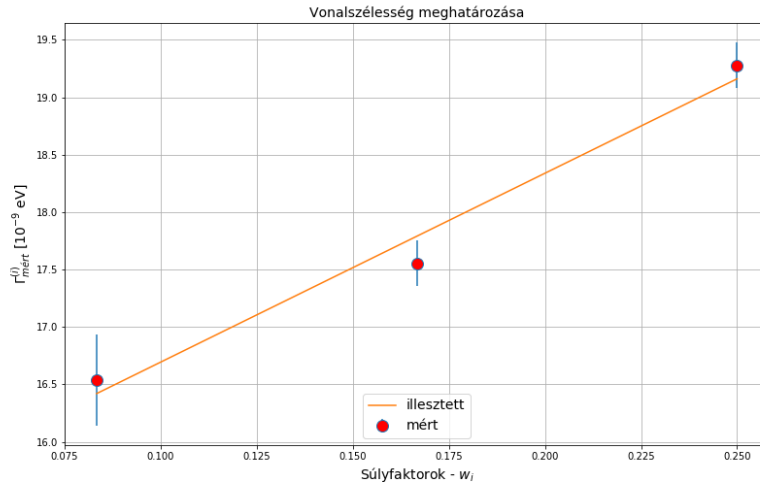
ahol T_A az abszorbens (itt lágyvas) T_F pedig a forrás vastagsága ω_i pedig az i -edik felhasadás relatív intenzitása. Lágy vas esetén ez Ha a fenti képletből

Ámenet	Arány	ω_i
$\pm \frac{3}{2} \leftarrow \pm \frac{1}{2}$: 3	1/4
$\pm \frac{1}{2} \leftarrow \pm \frac{1}{2}$: 2	1/6
$\pm \frac{3}{2} \leftarrow \mp \frac{1}{2}$: 1	1/12

a másodrendű tagokat elhanyagoljuk és felhasználjuk hogy $T_F = 1.62$ akkor a következő lineáris összefüggésre jutunk

$$\Gamma_{mert} = 2.4\Gamma + \frac{1}{4}T_A\omega_i\Gamma$$

Az 1.Táblázatból a vonalszélességeket ábrázolva a relatív intenzitások függvényében:



ahol az illesztett egyenes egyenlete:

$$f(x) = (16.441 \pm 2.457) \cdot x + 15.050 \pm 0.442$$

ami alapján a

$$\Gamma = (6.271 \pm 0.184) \cdot 10^{-9} \text{ eV}$$

$$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma} = (1.052 \pm 0.031) \cdot 10^{-07} \text{ s}$$

azaz a mért $\tau_{mert} = 105.2 \pm 3.1 \text{ ns}$ míg az irodalmi érték pedig $\tau_{irod} = 141.8 \text{ ns}$ ami jelentős eltérés. A minták relatív vastagságát szintén a fenti illesztésből lehet megkapni

$$T_A = \frac{4 \cdot (16.441 \pm 2.457)}{\Gamma_{cs}} = 14.586 \pm 2.608$$

ahol Γ_{cs} a csatornaszámbeli érték, hogy a vastagság egy dimenziótlan szám legyen. A többi mintára ez a vastagság a fenti képlet átrendezéséből

$$T_A = \left(4 \frac{\Gamma_i}{\Gamma} - T_F - 8 \right) \frac{1}{\omega_i}$$

így a rozsdamentes acél és a nátrium-nitroprusszid vastagsága:

$$T_{ac} = 5.081 \pm 0.444$$

$$T_{nn} = -0.872 \pm 0.1$$

a nátrium-nitroprusszidra kapott adat nyilvánvalóan fizikai ellentmondás. Annak hogy a másodrendű tag elhagyása mekkora mértékben módosítaná a kapott eredményeket, az elhagyott tag értéke a lágyvasra a fenti adatokkal és $\omega = 1/4$ $\delta = 0.013$ tehát csak a második tizedes jegyben okozna eltérést ami elhanyagolható.

2.4 Az elektromos térgradiens a nátrium-nitroprusszid mintában

A nátrium-nitroprusszidban az atomok elrendezéséből eredendően inhomogén elektromos tér alakul ki ami a mag kvadrupól momentumával kölcsönhatva a magnívók felhasadásához vezet. A felhasadás mértéke a jegyzet alapján

$$\Delta E = \frac{eQ}{4I(2I - q)} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} (3m_I^2 - I(I + 1)) \sqrt{1 + \frac{\eta^2}{3}}$$

ahol Q az atommag kvadrupól momentuma (itt $Q_{3/2} = 0.21 \cdot 10^{-28} m^2$), e az elemi töltés, I a magnívó spinje (itt $I = 3/2$) m_i a mag mágneses kvantumszáma (itt $m_i = \pm 3/2, \pm 1/2$), η pedig az asszimmetria faktor mely esetünkben 0. Mivel a képletben az m_i a négyzetre van emelve így az energiaszint csak kettő részre hasad fel, ezen két szint távolsága

$$\Delta E = \frac{eQ}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}$$

, a mérésein alapján ez a ΔE_m a Lorentz illesztésből megkapható

$$\Delta E_m = m * 59.51 = (8.277 \pm 0.716) 10^{-9} eV$$

amiből a fenti egyenlet segítségével a térgradiens értéke megkapható

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = (7.883 \pm 0.069) \cdot 10^{21} V/m^2$$

Összehasonlítás ként a hidrogénatom Bhor-modelljében az alapállapotú elektron által a proton helyén létrehozott elektromos térgradiense (amit a Coulomb potenciált kétszeri deriválásával kapunk)

$$\left. \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right|_{elm} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{r}{r_B^3} = 1.95 \cdot 10^{22} \frac{V}{m^2}$$

a mért és az elméleti adatok majdnem egy nagyságrendbe esnek.

2.5 Az ^{57}Fe mágneses momentuma a első gerjesztett állapotban és a B értéke a lágyvas mintában

A mágneses kvantumszám szerint degenerált nívók felhasadás külső mágneses térben a Zeeman-effektus, a felhasadás mértékét pedig a

$$\Delta E_m = -\frac{m_I}{I} \mu_I B$$

használjuk fel a (2.3) as fejezetben meghatározott relatív intenzitásokat az átmeneteket és határozzuk meg hozzájuk paraméteresen az energiák értékeit (A, B, C paraméterekkel) Isteni sugallatból azaz az előző évek jegyzőkönyveit ala-

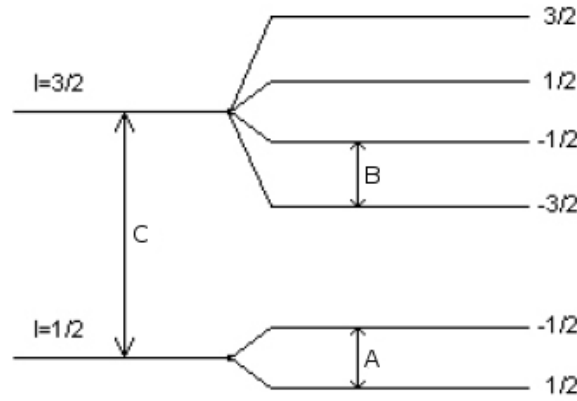


Figure 2: A felhasadt energia nívók szerkezete

Átmenet	Energia értékek paraméterekkel
$\pm \frac{3}{2} \leftarrow \pm \frac{1}{2}$	$A+3C$
$\pm \frac{1}{2} \leftarrow \pm \frac{1}{2}$	$A+C$
$\pm \frac{3}{2} \leftarrow \mp \frac{1}{2}$	$A-C$

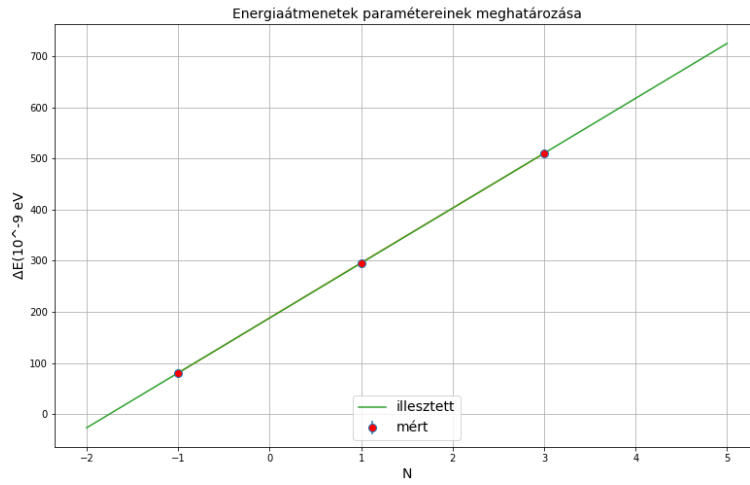
posan tanulmányozva megállapítható hogy a legpontosabb illesztés abban az esetben lehet tenni az adatokra ha a C függvényében $(3C, 1C, -1C)$ ábrázoljuk az adatokat és azokra egyenest illesztünk (ahol $N=(3, 1, -1)$)

$$N = C \cdot \Delta E + A$$

ahol ΔE a lágyvashoz tartozó energiaszintek felhasadásának mértéke

Átmenet	Energiaszint($10^{-9}eV$)
$\Delta E_1=A+3C$	509.90 ± 0.19
$\Delta E_1=A+C$	295.98 ± 0.16
$\Delta E_1=A-C$	80.56 ± 0.33

ha ezeket az adatokat az előző képlet alapján ábrázoljuk.



Az illesztett egyenes paramétereit

$$A = (188.145 \pm 0.414) \cdot 10^{-9}eV \quad C = (107.335 \pm 0.216) \cdot 10^{-9}eV$$

a jegyzet alapján a mag mágneses momentuma alapállapotban $\mu_{1/2} = 0,090604\mu_N$ illetve $\mu_N = 3,15238 \cdot 10^{-11} \frac{keV}{T}$ használjuk fel hogy az alapállapotban

$$\Delta E = \frac{\mu_{1/2}B}{I_{1/2}} = A$$

és a gerjesztett állapotban

$$\Delta E = \frac{\mu_{3/2}B}{I_{3/2}} = -C$$

ha a két egyenletet elosztjuk egymással akkor abból a $\mu_{3/2}$ meghatározható

$$\mu_{3/2} = -\frac{I_{3/2}}{I_{1/2}} \mu_{1/2} \frac{C}{A} = (-5.43 \pm 0.13) \cdot 10^{-12} \frac{keV}{T}$$

illetve az illesztett paraméterek segítségével kiszámolható a maghelyén lévő mágneses indukció

$$B = \frac{I_{1/2}}{\mu_{1/2}} A = (32.936 \pm 0.07) T$$

Ezt az értéket is érdemes összevetni az elektron által keltett mágneses térrel a meg helyén, ezt az értéket a

$$B_m = \frac{\mu_0 \hbar e}{m_e 4\pi r_b^3}$$

képlet adja meg aminek számszerű értéke

$$B_m = 12.5 T$$

az általunk mért érték ennek közel a három szorosa.

2.6 A forrás és a minta távolságából eredő lehetséges hiba

A mérés során végig felhasználtuk azt a tényt hogy a forrás és a minta közti távolság végig $\sim 1 cm$ marad ami persze nem igaz hiszen a mérés pont abból ered hogy a forrást mozgatjuk a kérdés, hogy mekkora a távolság különbségből eredő hiba. A hangszóróra adott jel alakjából tudjuk hogy a sebesség a periódus feléig nő utána pedig csökken. A periódus idő a jegyzet alapján $T_p = 41.2 \pm 2 ms$ az első alfejezetben számolt kalibrációs meredekséggel meglehet becsülni a maximális sebességet is.

$$v_{max} = c \frac{\Delta E_{256}}{E_0}$$

ahol E_{256} a 256-os csatornának megfelelő energia szint ami a T/4-hez tartozó csatornaszám.

$$v_{max} = (7.418 \pm 0.002) \frac{mm}{s}$$

ez alapján a maximális kitérés

$$d_{max} = v_{max} \frac{T}{4} = (0.0764 \pm 0.004) mm$$

azaz a maximális kitérés sem éri el az egytized millimétert tehát kijelenthető hogy ez a járulék elhanyagolható a mérés során.

2.7 A gravitációs vöröseltolódás kimérése

Ennek a módszernek a hihetetlen pontosságát az is mutatja hogy Pound és Rebka 1960-ban ezt az effektust kihasználva már 20m távon kitudta mutatni a gravitációs vörös eltolódást. Érdeemes kiszámolni hogy a laborba található eszközzel ennek a kiméréséhez milyen magasságra van szükség.

A földről indított $E_f = 14.4\text{keV}$ energiájú fotonnak meg kell másznia a föld által létrehozott gravitációs potenciált $\Phi = mgh$ és ezalatt a foton energiát veszít és így eltolódik a vörös felé. A laborban található eszköz pontossága 0.5 csatorna ezt átszámíthatjuk energiára ($E_l = 6.95 \cdot 10^{-10}\text{eV}$)-nak felel meg, azaz ha ennyit változik a foton energiája azt már ki lehet mérni az eddig is használt eszközzel. Ebből az energiából a magasságra

$$h = \frac{E_l}{E_f} \frac{c^2}{g} = 442.78$$

ilyen magasságra kéne tenni a detektort hogy az effektus kimérhető legyen. A mérést tovább bonyolítja hogy minél magasabban van a detektor annál kisebb térszög lesz a területe és így jelentősen tovább is tartana a mérés, illetve a fotonoknak amíg felérnek nem szabad hogy energiát adjanak le a köztes atomoknak így vagy egy vákuum csőben vagy speciális gázzal feltöltött csőben kéne a fotonokat a detektorig vezetni.