

Spintronikai anyagok elektronspin-rezonanciája

OTKA K107228 (2012.06.01–2017.05.31.)

Zárójelentés

Bevezetés

A pályázat kitűzött célja olyan anyagok/rendszerek – főleg elektronspin-rezonancia (ESR) spektroszkópiás – vizsgálata, amelyek spintronikai alkalmazásokban szerepet játszanak vagy potenciálisan szerepet játszhatnak a jövőben. Az ESR nagyszerűen alkalmas az anyagban található elektronspinek kölcsönhatásainak és e kölcsönhatásoknak az elektronspinek dinamikájára vett hatásának a kimutatására, illetve ezekkel kapcsolatos fizikai mennyiségek (pl. kicserélődési kölcsönhatások, anizotropia-energiák, relaxációs idők) pontos mérésére.

Az eredetileg megfogalmazott négy fő téma mindegyikében tettünk előrelépést, mindegyik kapcsolatban születtek publikációk, de a hangsúlyok különféle okokból eltolódtak. Több új, a pályázatban eredetileg nem nevesített, de ahhoz közvetlenül kapcsolódó projektbe is belekezdünk, amelyek közül sokat el tudunk vinni publikációig, többet egyelőre még nem, ennek megfelelően a beszámoló is hosszabb, mintha csak már publikált eredményeket sorolnánk föl.

Röviden összefoglalva: vizsgáltuk szerves töltésátviteli sókban mint alacsony dimenziós és frusztrált kvantum-spinrendszerek modelljeiben a spindinamikát; atomi simaságú vékonyréteg-heterostrukturákban a szubsztrát, ill. a szomszédos vékonyrétegek felületi hatását a ferromágneses vékonyrétegekre; többféle tömbi multiferroikus anyagban a spinek közötti kölcsönhatást, a rendeződésüket és dinamikájukat; a $Gd_3N@C_{80}$ endohedrális fullerénben a Gd^{3+} spinek közötti kölcsönhatást és az egyedi Gd_3N klasztereken megfigyelhető magnetoelektromos csatolást; és végül az aluldópolt szupravezető kuprátokban megjelenő, nemrégiben felfedezett töltés- és spinsűrűség-hullám koegzisztenciáját a szupravezetéssel.

Az ESR spektrométerünk alapját képező szupravezető mágnesünk használhatatlanná válása miatt, ennek pótlásának idő- és munkaigénye miatt menet közben kérvényeztük a pályázati futamidő egy évvel történő meghosszabbítását, amit engedélyezett a Természettudományi Kollégium elnöke.

A pályázat témájában összesen 14 publikációnk jelent meg nemzetközileg jegyzett (impaktfaktorral rendelkező) szakfolyóiratban, ezek kumulatív impaktfaktora 49,7.

Elvégzett kutatások

Szerves kristályok

A κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Cl réteges szerkezetű, szerves töltésátviteli só mágneses fluktuációit vizsgáltuk nagyfrekvenciás ESR spektroszkópiával az antiferromágneses átalakulás közelében. A fluktuációk a vonalak kiszélesedésén keresztül figyelhetők meg, anizotropak és befolyásolhatók a

mágneses térrel: erősen függnek annak nagyságától és irányától is [1]. Azt a meglepő megfigyelést tettük, hogy e fluktuációk gyakorlatilag – mérési pontosságunkon belül – függetlenek egymástól a szomszédos BEDT-TTF síkokban, ami arra utal, hogy ebben az anyagban az antiferromágneses rendeződés „valódi kétdimenziós fázisátalakulás”: az intuícióval szemben nem a harmadik irányban lévő gyenge korrelációk stabilizálják azt, hanem a síkokon belüli – szintén igen gyenge – anizotrópiák [6]. Ismereteink szerint a feles spinű, anizotrop antiferromágnesek fluktuációinak leírására csak egy dimenzióban létezik elmélet. Rózsa Leventével együttműködve numerikus szimulációkat végeztünk két dimenzióban is az anizotrópia–hőmérséklet–mágneses tér fázisdiagram feltérképezésére. E számolások kvalitatívan reprodukálták a megfigyeléseinket, de a leírás kvantitatív helyességét egyelőre nem tudtuk igazolni.

Tanulmányoztuk a δ -(EDT-TTF-CONMe₂)₂AsF₆, egynegyedes betöltésű molekuláris só alacsony hőmérsékletű mágneses rendeződését. Azt találtuk, hogy ebben a szerkezetileg kétdimenziós anyagban, hiába hasonló erősségű a kicserélődési kölcsönhatás a szomszédos spinek között két irány mentén is, a töltésrendeződés olyan mágneses frusztrációhoz vezet, amely egymással szomszédos, de effektíve egymástól szinte teljesen szétcsatolt molekulaláncok kialakulását eredményezi: ezzel magyaráztuk a 40 K-en elkezdődő antiferromágneses rendeződés általunk megfigyelt széles „szétkenődését”, azaz hogy az egészen 4 K-ig nem történik meg teljesen, és azt, hogy az egyes láncok ESR-je egymástól gyakorlatilag független [10].

Mágneses és szupravezető vékonyrétegek kölcsönhatása egymással és a szubsztráttal

Ferromágneses rezonanciás (FMR) kísérleteket végeztünk BiTiO₃ szubsztrátra növesztett La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃ (LCMO) vékonyrétegeken. Polarizált neutronreflexiók kísérletek megmutatták, hogy a szubsztráthoz közeli LCMO rétegekben a mágnesség erősen elnyomódik, amivel az FMR nehezen érthető orientációfüggését úgy tudtuk legalább kvalitatívan modellezni, hogy feltettük, hogy e felületi rétegekben a domináns mágneses anizotrópia előjelet vált: a könnyű mágnesezési irány itt merőleges a határfelületre. Az SrTiO₃ (STO) szubsztrátra növesztett LCMO rétegek FMR-jével összehasonlítva e kísérleteket az ezen mintákban releváns magnetoelasztikus kölcsönhatást is értelmezni tudtuk [4].

Egy másik kísérletsorozatunkban azt vizsgáltuk, hogy az STO szubsztrátra 18 nm vastagságú LCMO mellé atomi pontossággal illesztett, de mindössze 3 nm vastagságú LaCoO₃ vékonyréteg hogyan befolyásolja az LCMO ferromágneses tulajdonságait. Az FMR analízise egyértelműen kimutatta, hogy e rétegek sorrendje alapvetően meghatározza a LaCoO₃ hatását: gyakorlatilag nem befolyásolta az LCMO FMR-jét, amikor a LaCoO₃-at az LCMO szabad felületére növesztettük, ugyanakkor drasztikusan megváltoztatta az anizotrópia-paramétereket, amikor a szubsztrátra pufferréteggént először a LaCoO₃-at növesztettük, majd arra az LCMO-t. A legfontosabb változás, hogy az anizotrópia egytengelyű könnyű iránya ilyenkor a rétegre merőlegessé válik, a vékonyrétegben a spontán mágnesezettség csak a réteg alkanizotrópiája miatt marad többé-kevésbé a síkban [11]. E megfigyelésünk az elméleti érdekességen túl gyakorlati szempontból is releváns ilyen rétegek mágneses tulajdonságainak finomhangolásához.

Pár nanométeres SrIrO₃, réteg hatását is vizsgáltuk az LCMO anizotrópiájára, amelynél az volt a várakozásunk (és reményünk), hogy a könnyű mágnesezési irány az alakanizotrópiát is legyőzve a síkra merőleges lesz, de maradt a síkban, sőt az anizotrópia növekedett is, körülbelül megduplázódott. Ezt az eredményünket emiatt nem találtuk elég érdekesnek, hogy önmagában publikáljuk.

Dolgoztunk még STO-ra növesztett LCMO/STO/LCMO/STO/... multirétegek FMR-jén, amelynek értelmezését különösen izgalmassá és nehezzé tette a néhány atomi rétegnyi, tömbi formájában nem mágneses STO-n keresztül a rétegek közötti indirekt kicserélődési kölcsönhatás, ill. az STO/LCMO határokon lévő, tipikusan 1-1 atomnyi vastagságban erősen perturbált határréteg. Ezek az FMR-ben finomsztruktúra megjelenését okozzák, de az általunk javasolt, az FMR-rel konzisztens mikroszkopikus mágneses modellt az elektronszerkezet-számításokkal foglalkozó kollégákkal nem tudtunk közös nevezőre hozni, miközben a felvett spektrumaink minősége nem elég jó ahhoz, hogy az FMR önmagában perdöntő legyen. Sajnos reménytelen a spektrumok minőségét újabb mérésekkel megpróbálni javítani, csak abban bízhatunk, hogy az eddigi eredményeink alapján tervezett új, konkrétan ehhez a kísérlethez készített mintákat fogunk tudni szerezni (aminek időskálája éves nagyságrendű).

E nanomágneses minták modellezésének mintegy „melléktermékeként” született egy eredményünk önszervező nanopórusos anódos alumínium-oxid (NAAO) membránba szintetizált, egymással kölcsönható Co – és kontrollként elhanyagolható kristálytér-eredetű anizotrópiájú Co₃₀Fe₇₀ – nanodrótokból készült rácsok mágnesezettségének vizsgálatából [14].

Multiferroikus anyagok mágneses rezonanciája

A legnagyobb hatást keltő eredményünk a multiferroikus Ba₂CoGe₂O₇-ben széles sávú ESR-rel talált nem triviális mágneses gerjesztések, illetve $q = 0$ spinhullámok. Ebben az anyagban a Co²⁺ ionok $S = 3/2$ antiferromágneses négyzettrácsok(ka)t alkotnak, de úgy, hogy a spinek közötti kicserélődésnél majdnem egy nagyságrenddel nagyobb a rájuk ható egyion-anizotrópia. A cikkben kísérletileg és elméletileg is megmutattuk, hogy az $S > 1/2$ spinű, nagy anizotrópiájú mágneses anyagokban nem rendkívüliek az olyan kollektív mágneses módusok, amelyeknél az alrácsmágnesezettség nagysága is, és nem csak iránya oszcillál, vagy például, amelyeknél a mágneses kvadrupólus-momentum is oszcillálhat [3].

Ezt az anyagot magmágneses rezonanciával (NMR-rel) is vizsgáltuk. Kiderült, hogy a ⁵⁷Co NMR-jén keresztül is megfigyelhető a magnetoelasztikus csatolás, konkrétan a Co²⁺ ionok és az őket körülvevő, lapított (magnetoelasztikus csatolás nélkül lokálisan D_{2d} pontcsoport szimmetriájú) oxigén-tetraédernek a torzulása a Co²⁺ ion mágneses állapotának függvényében. Egyáltalán nem volt magától értetődő a kísérletek tervezésekor, hogy ezek a pikométer törtrészének megfelelő elmozdulások kiértékelhetően megjelennek majd az NMR-spektrumokban. Az várható volt, hogy az egyes antiferromágneses alrácscok ⁵⁹Co magjainak spektrumát a mágneses hiperfinom kölcsönhatás miatt külön fogjuk látni, de hogy az elmozdulásokhoz tartozó elektromos kvadrupólus kölcsönhatás hatása is azonosítható lesz, az nem. Martina Schädler (Augsburgi Egyetem) NMR és nukleáris kvadrupólus-rezonancia (NQR) spektrumokat is felvett, amiket mi értékeltünk ki és

modelleztünk. A spektrumok értelmezését nagyban bonyolítja (az teszi izgalmassá), hogy a Co^{2+} spinek közötti kicserélődés összemérhető az alkalmazott NMR mágneses térrel, az alrácsmágnesezettségek folyamatosan változnak – nőnek és forognak – a térsweepelt spektrumok felvétele közben, aminek bonyolult függvényében változik az elektromos kvadrupólus-kölcsönhatás, miközben ezek fő irányai sem egymással, sem a külső térrel nem párhuzamosak. A modellezéshez szükség volt általánosítani a szokásosan használt, az irodalomban megtalálható hiperfinom és kvadrupólus kölcsönhatást leíró NMR-formulákat. Az NMR spektrumok ilyen modellezése részben megerősítette, részben pontosította az ESR spektrumok modellezésekor kapott mikroszkopikus paramétereket, de jóval több ismeretlen paramétert tartalmaz (több ion-ion kölcsönhatási tagot, köztük magnetoelasztikus csatolási tagot, és anizotrop hiperfinom csatolási állandókat), és bár a fő kép szinte biztosan összeállt már, a részletek teljes körű tisztázásának még nem értünk a végére. Úgy gondoljuk, hogy a sok változó párhuzamos optimalizálása csak szuperszámítógéppel lehetséges reálisan: egy nagy teljesítményű asztali PC-n egyszerre csak 3 változó optimalizálása lehetséges, és egy-egy ilyen lépés pedig önmagában 1-2 napig tart. Folyamatban van a számítások adaptálása szuperszámítógépre.

Egy másik multiferroikus anyagcsaládban, az ACr_2O_4 spinell-oxidokban ($A = \text{Mn, Fe, Co, Ni, Cu}$) az „A” ionon lévő $3d$ pályák betöltésének a hatását vizsgáltuk. Legfontosabb eredményünk, hogy a pályadegenerált rendszerekben a Jahn–Teller-átalakulás miatt erős magnetoelaszticitás is megjelenik, míg ahol nincs pályadegeneráció, ott csak multiferroikus és magnetoelktromos hatásokat figyelünk meg, mert jobb közelítéssel megmarad a köbös spinellszerkezetük [5].

ESR-rel tanulmányoztuk a spindinamikát „hézagos v. üreges” spinell szerkezetű, Néel-típusú skyrmionos fázist mutató GaV_4S_8 egykristályokban. A mágneses tér függvényében felvett széles sávú (0–26,5 GHz) ESR spektrumokon azonosítottuk a 11 K-en adott tértartományban megjelenő skyrmionrács-hoz tartozó kollektív mágneses gerjesztéseket. Ahogy a skyrmionrács-fázis megjelenése függ az eredetileg köbös kristályok alacsony hőmérsékleten fellépő torzulásának négyféle lehetséges irányú, $[1, \pm 1, \pm 1]$, trigonális torzulása és a mágneses tér által bezárt szögtől, ugyanúgy az egyes orientációkban más-más mágnesestér-tartományokban jelennek meg ezek a kollektív gerjesztések, és más-más is a frekvenciájuk. Sikeresen azonosítottuk a skyrmionok ún. „lélegző” és mindkét irányú ún. „örvénylő v. kavargó” módusát [9]. Fix 34 GHz-es frekvenciájú ESR spektrumokon a GaV_4S_8 rendszer ferromágneses állapotában az FMR irányfüggését tanulmányoztuk, amiből sikeresen határoztuk meg a trigonális torzuláshoz asszociálható uniaxiális anizotrópia-energiát és annak hőmérsékletfüggését [12].

Egy másik multiferroikus anyagcsalád, a ritkaföldfém-ferroborátok egyik érdekes tagjának, a $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$ -nak is vizsgáltuk az alapállapotú mágneses tulajdonságait. Ennek az anyagnak az érdekességét az adja, hogy az $S = 6$ Tb-spinek az extrém anizotrop környezetük miatt gyakorlatilag hatalmas Ising-spinekként viselkednek, és lokális háttérként befolyásolják a vasionok rendeződését, ami a régebben gondoltnál jóval összetettebb mágneses szerkezethez vezet. Sikeredt olyan minimális mikroszkopikus modellt felállítanunk – sokkal részletesebbet, mint az addigiak –, amely mind a mágnesezettség térfüggését, mind az ESR spektrumaink alacsony energiás tartományát jól reprodukálja a mágneses tér széles (0–30 T) tartományában [15].

A $Gd_3N@C_{80}$ mágneses szerkezete

A $Gd_3N@C_{80}$ endohedrális fullerén érdekességét részben az adja, hogy sokat vizsgálták magmágneses rezonanciás képalkotáshoz mint potenciális kontrasztanyagot, pontosabban mint humán gyógyászatban is alkalmazható kontrasztanyag alap-építőelemét, de nagy és izolált spinje miatt spintronikai alkalmazásokban is játszhat szerepet jól manipulálható spinje: akár maga a spin [16], akár mint kvantumpöttyöt moduláló lokális hatás [17]. Emellett ESR laboratóriumunkban nagy hagyománya van a fullerének vizsgálatának, különösen a pályázatban részt vevő Jánossy András, de a vezető kutató is sok sikeres vizsgálatot végzett fulleréneken (tíznel több publikáció [18]).

Még a futamidő első évében publikáltuk a 3 db $S = 7/2$ spinű Gd^{3+} iont tartalmazó Gd_3N klasztert magában foglaló fullerén mágneses alaptulajdonságait. Megállapítottuk, hogy az egy klaszteren ülő Gd^{3+} spinek között is olyan gyenge a kölcsönhatás, hogy szobahőmérsékleten már gyakorlatilag független spinekként viselkednek, ami fontos tény a lehetséges kontrasztanyagok NMR-relaxációt befolyásoló képességének szempontjából. Az alacsony hőmérsékleten (<100 K-en) megfigyelhető dinamikát ugyanakkor nem sikerült konzisztensen értelmeznünk: se a C_{80} labdák forgási dinamikáját, se a Gd_3N klaszter és a labdák közötti dinamikát, de a Gd^{3+} ionok közötti részletes kölcsönhatást sem sikerült pontosan leírni, ill. éppen azt mutattuk ki több frekvencián is végzett ESR kísérleteinkkel, hogy a kép jóval bonyolultabb annál, mint ahogy a tömbi mágneszettségmérések sugallják [2].

Nagy Károly akkori diplomamunkáimmal e kép tisztázását tűztük ki célul, első lépésként a Gd^{3+} -ionok közötti kölcsönhatás pontosabb mikroszkopikus leírásával [19], azonban e pontosítás nemhogy nem csökkentette a kérdőjelek számát, hanem kifejezetten szembetűnővé tett egy ellentmondást már csak az ESR spektrumok értelmezésén belül is: egyes tiltott vonalak intenzitása jóval a modellezett érték fölött volt. Ezt az anomáliát az egyes, egymással nem kölcsönható molekulákon is külön-külön szerepet játszó magnetoelektromos effektussal sikerült magyaráznunk, ami olyan fundamentális fizikai kérdéseket vetett föl, amelyek a kvantum és klasszikus világok közötti határátmenettel, illetve az e mechanizmushoz asszociálható attométeres nagyságrendű elmozdulások, torzulások fizikai valóságként történő értelmezéséhez is hozzájárulnak. Sajnos a pontosabb méréseket, ill. a megfigyeléseink mindenki számára való megkérdőjelezhetetlen bizonyítását több, egymásnak többé-kevésbé ellentmondó és a spektrométerünk határait feszegető-átlépő kritérium hátráltatja (a legegyszerűbb pl. kis térfogatú minta vs kielégítő jel/zaj viszony), sőt csak e probléma tanulmányozása közben értettük meg azt is, milyen szerencsés tényezők kellettek már magának ennek az effektusnak a megjelenéséhez is. Sok időt és energiát fordítottunk e mérések tökéletesítésére, a spektrométerünket is többször fejlesztenünk kellett menet közben, mostanra építettük meg a második célzottan erre a kísérletre kifejlesztett mérőfejünket, amellyel e kutatást folytatni tudjuk, ill. remélhetőleg hamarosan dűlőre is vinni.

A kutatások során felmerült, hogy a Raman-szórás ESR-en keresztüli modulációjával is vizsgáljuk ezt a kereszteffektust, emiatt részt vettünk egy másik laboratóriumban történő Raman-spektrométer fejlesztésében [7], de azt találtuk, hogy egyelőre irreális ezt az irányt folytatnunk, így e kísérletek lekerültek a napirendről.

Töltéssűrűség-hullám az $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.55}$ -ben, dipólus-dipólus kölcsönhatás

Nagy nemzetközi visszhangot váltott ki, amikor pár éve szupravezetés és töltéssűrűség-hullámok egyidejű létezését mutatták ki aluldópolt kuprát szupravezetők egy családjában, az $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ -ban [20]. A spintronika egyik régi („örök”) kérdése a vezető és mágneses anyagok hatékony házasítása (ld. pl. mágneses félvezetők), emiatt kétségtelen, hogy e téma közvetlenül kapcsolódik a jelen pályázathoz, ráadásul a pályázatban részt vevő Jánossy Andrásnak és a vezető kutatónak (aki a PhD-ját is ebben a témában írta, ill. ld. [21]) nagy tapasztalata van ezen anyagok ESR-es kutatásában. Mi is belefogtunk tehát ennek a jelenségnek a vizsgálatába, és nemzetközi együttműködésben szereztünk gadolíniummal dópolt $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.55}$ pormintákat, amelyekben mi is sikeresen mutattuk ki a töltéssűrűség-hullámokat [8], de eredményeink nem voltak mindenben konzisztensek az irodalomban található (és azóta is megjelent) NMR-eredményekkel.

Mi a töltéssűrűség-hullámokat az egyes ESR-vonalak eltérő kiszélesedésén keresztül mutattuk ki, mértük meg amplitúdójukat, így kényszerültünk a kiszélesedést okozó effektusok pontos számbavételére és modellezésére, amiközben kiderült, hogy ehhez a szokásosnál jóval alaposabban kell megvizsgálni a Gd^{3+} -ionok közötti dipólus-dipólus kölcsönhatás járulékát. Kénytelenek voltunk kidolgozni a van Vleck-féle momentum módszer („van Vleck's method of moments”) általánosítását egyszerre (i) anizotrop környezetben és (ii) alacsony koncentrációban, random módon elhelyezett spinekre és (iii) alacsony, a Zeemann-effektussal összemérhető hőmérsékletekre. Az irodalomban megtalálható a momentum módszer olyan kiterjesztése, amely ezek közül figyelembe vesz egyet vagy kettőt, de nekünk ezek mindegyikére egyszerre van szükségünk. Kiderült, hogy e számolás nagyon messzire vezet, nem is tudtuk teljesen végigvinni, ugyanakkor önmagában is érdekesnek bizonyult, mert pl. az intuícióval ellentétes következményei is vannak, éppen ezért azt tervezzük, hogy külön is fogjuk publikálni. Annyit egyértelműen sikerült tisztáznunk, hogy az általunk a $\text{Gd}:\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.55}$ -ben tapasztalt vonalkiszélesedést nem okozhatja a dipólus-dipólus kölcsönhatás, ami azt erősíti meg, hogy a mi mérésünk és az NMR-eredmények közötti ellentmondást okozhatja a mi nagyobb pontosságunk is.

A dipólusok közti kölcsönhatást tisztázni szándékozó számolásaink egyben lehetőséget adtak, hogy részt vegyünk egy a nemrég „újra felfedezett”, a grafénnal analógiát mutató fekete foszfor elektromos tömbi tulajdonságait célzó vizsgálatsorozatban. E kísérletek azt mutatták, hogy a fekete foszfor enyhén dópolt félvezető, két viszonylag kis energiás gappal [13].

Eltérések az eredeti pályázathoz képest

E pályázat eredetileg kitűzött céljait, és a négy fő témáját alapvetően érintő változás nem történt a futamidő során, ugyanakkor az egyes témák közötti hangsúlyok megváltoztak, egyes részfeladataik kevésbé, mások – köztük újak – pedig érdekesebbnek, kutatásra érdemesebbnek, ígéretesebbnek bizonyultak tanulmányozásuk közben. Bizonyos részfeladatoknál a minták minősége, újabbak elérhetősége befolyásolta a projekt haladását előre megjósolhatatlan módon. Az ezzel kapcsolatos konkrétumokat a beszámoló előző szakaszában részleteztük.

Változások a munkatervben

Ahogy az alap kutatásoknál természetes, nem tudtuk 100%-os pontossággal előre megtervezni a kutatást, és éppen a legnehezebb, legtöbb fejtörést és izgalmat okozó, de egyben energiát igénylő problémák közül többet sem sikerült a beszámoló megírásáig publikálásig vagy akár csak a megnyugtató megoldásig elvinnünk. Ugyanakkor bizakodásra ad okot, hogy mindegyikben tudtunk előrelépni, és a fontosabbak több év elmúlása ellenére sem veszítettek aktualitásukból, továbbra is bátran reméljük, hogy nemzetközi szinten is érdeklődést kiváltó publikációk fognak születni még belőlük.

A szupravezető mágnesünk meghibásodása és pótlása több mint egy évnyi kiesést jelentett a laborunkban elvégezhető (jellemzően: nagy időigényű, sok tesztet és aprólékos munkát, kísérletezést igénylő) mérésekkel, ráadásul sok extra munkát is adott a mágnesnek a beüzemelése, kalibrációja, a mérőrendszerhez való adaptálása, de leginkább a kezdeti működési hibák kijavítása és a tesztelések. E kiesést szerencsére sikerült részben kompenzálnunk a lausanne-i EPFL-en üzemelő, a vezető kutató által még posztdoktorként épített, és a laborunkban üzemelőhöz hasonló, nagyfrekvenciás ESR spektrométeren általunk és együttműködésben végzett mérésekkel.

Költségek, résztvevők változása

Minden változtatáshoz megkaptuk a Természettudományi Kollégium mindenkori elnökének engedélyét, de röviden felsorolom itt is őket.

Egy régi turbomolekuláris vákuumszivattyúnk 2015-ban meghibásodott, melynek javítása 665 ezer forintba került, egy másik, rotációs vákuumszivattyúnk pedig 2016-ban jutott el oda, hogy gazdaságtalanná vált a további javít(gat)ása, ennek pótlásáról kellett gondoskodnunk az eredeti beruházási terveken felül. Nagyfrekvenciás ESR méréseink zajforrásainak módszeres feltárásához műszerparkunkat fejlesztenünk kellett egy széles sávú spektrumanalizátor és a hozzá tartozó tracking generátor beszerzésével. E fejlesztés elsősorban a $Gd_3N@C_{80}$ kísérleteink sikerességét szolgálta, szolgálja.

Egy diplomamunkásom magánjellegű okokból felfüggesztette BME-s tanulmányait, így a velem folytatott munkáját is. Személyes okokból a tervezettnél és ideálisnál én is jóval kevesebb utazást tudtam vállalni, akár konferenciák, akár nemzetközi együttműködés céljából, ami a költségkeretek felhasználásán is nyomot hagyott.

Egy végzős hallgatónkat a pályázat futamidejének elején csatlakoztattuk név szerint a pályázathoz, hogy a kutatással kapcsolatos utazását finanszírozni tudjuk e forrásból, valamint a pályázat adminisztratív teendőit segítő két tanszéki munkatársamat is csatlakoztatni kellett utólag a pályázathoz, hogy munkakörükön túli ezzel kapcsolatos feladataikat kompenzálni tudjam.

Irodalomjegyzék

[1] Antal A, Feher T, Nafradi B, Forro L, Janossy A: *Magnetic fluctuations above the Neel temperature in kappa-(BEDT-TTF)(2)Cu[N(CN)(2)]Cl, a quasi-2D Heisenberg antiferromagnet*

- with *Dzyaloshinskii-Moriya interaction*, PHYS STAT SOL B BASIC RES 249: (5) 1004-1007, 2012.
- [2] Nafradi, B; Antal, A; Pasztor, A; Forro, L; Kiss, LF; Feher, T; Kovats, E; Pekker, S; Janossy, A: *Molecular and Spin Dynamics in the Paramagnetic Endohedral Fullerene Gd₃N@C₈₀*, J. Phys. Chem. Lett. 3 (22), pp 3291–3296, 2012.
- [3] Penc, K; Romhányi, J; Room, T; Nagel, U; Antal, Á; Fehér, T; Jánossy, A; Engelkamp, H; Murakawa, H; Tokura, Y; Szaller, D; Bordács, S; Kézsmárki, I: *Spin-Stretching Modes in Anisotropic Magnets: Spin-Wave Excitations in the Multiferroic Ba₂CoGe₂O₇*, Phys. Rev. Lett. 108, 257203, 2012.
- [4] Alberca, A.; Nemes, N. M.; Mompean, F. J.; Feher, T.; Simon, F.; Tornos, J.; Leon, C.; Munuera, C.; Kirby, B. J.; Fitzsimmons, M. R.; Hernando, A.; Santamaria, J.; Garcia-Hernandez, M.: *Magnetoelastic coupling in La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃/BaTiO₃ ultrathin films*, Phys. Rev. B 88, 134410, 2013.
- [5] Kocsis, V; Bordacs, S; Varjas, D; Penc, K; Abouelsayed, A; Kuntscher, CA; Ohgushi, K; Tokura, Y; Kezsmarki, I: *Magnetoelasticity in ACr₂O₄ spinel oxides (A= Mn, Fe, Co, Ni, and Cu)*, Phys. Rev. B 87, 064416, 2013.
- [6] Antal, A; Feher, T; Nafradi, B; Forro, L; Janossy, A: *Two-dimensional Magnetism in kappa-(BEDT-TTF)(₂)Cu[N(CN)(₂)]Cl, a Spin-1/2 Heisenberg Antiferromagnet with Dzyaloshinskii-Moriya Interaction*, J. Phys. Soc. Japan 84, 124704, 2015.
- [7] Dzsaber, S; Negyedi, M; Bernath, B; Gyure, B; Feher, T; Kramberger, C; Pichler, T; Simon, F: *A Fourier transform Raman spectrometer with visible laser excitation*, J. Raman Spectrosc. 46, 327-332, 2015.
- [8] Nagy, K; Janossy, A; Cooper, JR; Williams, GVM; Nafradi, B; Forro, L; Feher, T: *Charge density modulations in YBa₂Cu₃O_{6.55} and YBa₂Cu₄O₈ probed by electron spin resonance*, 11th International Conference on Research in High Magnetic Fields (1st – 4th July 2015, Grenoble, France)
- [9] Ehlers, D; Stasinopoulos, I; Tsurkan, V; Krug von Nidda, H-A; Fehér, T; Leonov, A; Kézsmárki, I; Grundler, D; Loidl, A: *Skyrmion Dynamics under Uniaxial Anisotropy*, Phys. Rev. B 94, 014406, 2016.
- [10] Nafradi, B; Antal, A; Feher, T; Kiss, LF; Meziere, C; Batail, P; Forro, L; Janossy, A: *Frustration-induced one-dimensionality in the isosceles triangular antiferromagnetic lattice of delta-(EDT-TTF-CONMe₂)(₂)AsF₆*, Phys. Rev. B 94, 174413, 2016.
- [11] Cabero, M; Nagy, K; Gallego, F; Sander, A; Rio, M; Cuellar, FA; Tornos, J; Hernandez-Martin, D; Nemes, NM; Mompean, F; Garcia-Hernandez, M; Rivera-Calzada, A; Sefrioui, Z; Reyren, N; Feher, T; Varela, M; Leon, C; Santamaria, J: *Modified magnetic anisotropy at LaCoO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ interfaces*, APL Mater. 5, 096104, 2017.

- [12] Ehlers, D; Stasinopoulos, I; Kezsmarki, I; Feher, T; Tsurkan, V; von Nidda, HAK; Grundler, D; Loidl, A: ***Exchange anisotropy in the skyrmion host GaV4S8***, J. Phys.: Condens. Matter 29, 065803, 2017.
- [13] Markus, BG; Simon, F; Nagy, K; Feher, T; Wild, S; Abellan, G; Chacon-Torres, JC; Hirsch, A; Hauke, F: ***Electronic and magnetic properties of black phosphorus***, Phys. Stat. Sol. B 254, 1700232, 2017.
- [14] Rotarescu, C; Moreno, R; Fernandez-Roldan, JA; Trabada, DG; Nemes, NM; Feher, T; Bran, C; Vazquez, M; Chiriac, H; Lupu, N; Ovari, TA; Chubykalo-Fesenko, O: ***Effective anisotropies in magnetic nanowires using the torque method***, J. Magn. Magn. Mater., 2017.
- [15] Szaller, D; Kocsis, V; Bordacs, S; Feher, T; Room, T; Nagel, U; Engelkamp, H; Ohgushi, K; Kezsmarki, I: ***Magnetic resonances of multiferroic TbFe₃(BO₃)(4)***, Phys. Rev. B 95, 024427, 2017.
- [16] Farberovich, OV; Gritzaenko, VS: ***Entanglement manipulation by a magnetic pulse in Gd₃N@C₈₀ endohedral metallofullerenes on a Cu(001) surface***, <https://arxiv.org/abs/1609.01959> (2016).
- [17] Hermanns, CF et al.: ***Magnetic Coupling of Gd₃N@C₈₀ Endohedral Fullerenes to a Substrate***, Phys. Rev. Lett. 111, 167203 (2013).
- [18] Stephens, PW et al., Nature 370, 636 (1994); Janossy, A et al., Phys. Rev. Lett. 79, 2718 (1997); Chauvet, O et al., Phys. Rev. Lett. 72, 2721 (1994); Rockenbauer, A et al., Phys. Rev. Lett. 94, 066603 (2005); Janossy A et al., Phys. Rev. Lett. 71, 1091 (1993); Simon et al., Phys. Rev. Lett. 97, 136801 (2006) etc.
- [19] Nagy, K: ***Gd₃N@C₈₀, egy potenciális MRI kontrasztanyag mágneses tulajdonságai (diplomamunka)***, BME Fizika Tanszék (2014).
- [20] Wu, T: ***Magnetic-field-induced charge-stripe order in the high-temperature superconductor YBa₂Cu₃O_y***, Nature 477, 191 (2011).
- [21] Janossy, A et al., Phys. Rev. Lett. 79, 2726 (1997); Julien, MH et al., Phys. Rev. Lett. 84, 3422 (2000); Feher, T et al., Phys. Rev. Lett. 87, 047002 (2001); Janossy, A et al., Phys. Rev. Lett. 91, 177001 (2003) etc.