

# Szélessávú mágneses-optikai spektroszkópia összetett mágneses anyagokon

## Záró beszámoló

A projekt alapvető célkitűzése egy széles fotonenergia tartományban használható és a nagy érzékenység érdekében polarizáció modulációs elven működő magneto-optikai spektrométer kifejlesztése a BME Fizika Tanszékén, ami kereskedelmi forgalomban nem hozzáférhető. A moduláris és a változó kísérleti feladatokhoz dinamikusan illeszthető mérőegység építése befejeződött. A fejlesztés során megvalósítottuk a polarizáció modulációs technika adaptációját egy az infravörös tartományt (80meV-1eV) átfogó Fourier transzformációs spektrométerre illetve egy az ultraibolyától a közeli infravörösig terjedő tartományt (0.7-6eV) lefedő diszperziós monokromátorra. Az így megépített optikai mérőegység polarizációváltozás nagy,  $\sim 0.001$  fok pontosságú detektálását teszi lehetővé mind reflexiós, mind transzmissziós geometriában a teljes 80meV-6eV fotonenergia tartományon, ami világviszonylatban is kiemelkedő és egyedi. A spektrométer építésében, illetve az eszközzel mágneses anyagokon és biológiai mintákon történő mérésekben témavezetésemmel három PhD hallgató és két MSc-s diák vett részt.

## Magneto-optikai effektusok kutatása szigetelő és fémes mágnesekben

(i) Fémes mágnesekben a spin-polarizált elektronszerkezet meghatározása komoly kísérleti és elméleti feladat, amely elősegítheti tökéletesen spin polarizált vezetők célzott kutatását és szintézisét.  $\text{CuCr}_2\text{Se}_4$  kristályokon végzett méréseinkkel megmutattuk, hogy az egyszerű abszorpciós és a vele komplementer információkat szolgáltató magneto-optikai spektroszkópia együttes alkalmazásával a spin-polarizált sáv szerkezet nagy pontossággal meghatározható. Ezen anyagban a mágnesség mikroszkopikus mechanizmusában a lokalizált  $\text{Cr}^{3+}$  spinek és a vezetési elektronok kölcsönhatása domináns szerepet játszik és majdnem tökéletes spin polarizációt eredményez.

-New Journal of Physics 12, 053039 (2010)-

(ii) Spin kiralitással bíró fémes mágnesekben szokatlanul erős anomális Hall effektus tapasztalható, ami a Fermi energiánál található közel-degenerált (ún. "anti-crossing") sávok közötti elektron gerjesztések következménye.  $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$  sáv szerkezetének töltéshordozó adalékolással történő folytonos hangolásával megmutattuk, hogy a fenti sávkeresztezés felelős az anyagban fellépő anomális Hall effektusért. Az alacsony energiás magneto-optikai spektrumban közvetlenül nyomon követtük az anomális Hall rezonancia eltolódását a Fermi energiához képest.

-Physical Review Letters 103, 267206 (2009)-

(iii) A laboratóriumunkban kifejlesztett lézer fényforrásra épülő magneto-optikai mikroszkóppal vizsgáltunk laterálisan kompozíció hangolt, epitaxiálisan növesztett  $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{RuO}_3$  filmeket. Elsődleges célunk a rendezetlenség szerepének, a ferromágneses alapállapotra és a spindinamikára gyakorolt hatásának felderítése volt. Ezekben a mesterséges mágneses

szerkezetekben a Ca-Sr arány lineárisan változik a film egy laterális iránya mentén. A rendezetlenség  $\text{Sr}^{2+}$  és  $\text{Ca}^{2+}$  ionok eltérő ionsugarából adódik. A magneto-optikai Kerr mikroszkópunk térbeli felbontása  $\sim 20 \mu\text{m}$ , mely lehetővé tette a lokális mágneses tulajdonságok (mágnesezettség és szuszceptibilitás) egyedülállóan finom feltérképezését a Ca-Sr arány függvényében. Azt találtuk, hogy a rendezetlenség hatására a ferromágneses fázis erősen kiterjed. Továbbá, Ca és Sr ionok önszerveződő elkülönülése és  $\sim 10 \text{ nm}$  méretű szigetekbe való tömörülése még érteljesebben segíti térben inhomogén ferromágneses fázisok kialakulását mint a korrelálatlan rendezetlenség. Ezek a szigetek, beágyazva a vezetési elektronok tengerébe, túlcillapított spindinamikát mutatnak és véges méretük ellenére sztatikus mágneses rendezést mutatnak.

-Physical Review Letters 108, 185701 (2012)-

(iv) Az erős spin-pálya csatolással rendelkező rendszerek közül a BiTeI keskeny tiltottsávú félvezetőt illetve ennek elektron és lyuk adalékolt származékait vizsgáltuk. Azt találtuk, hogy ez az anyag – paramágneses mivolta ellenére – rendkívül nagy, ferromágnesekre jellemző mértékű magneto-optikai aktivitást mutat, mely az erős Rashba felhasadás direkt következménye. A magneto-optikai spektrumok kvantitatív értelmezésére sávszerkezeti számításokon alapuló elméleti modellt alkottunk. A modell segítségével rámutattunk, hogy a kiugró magneto-optikai aktivitást a Rashba sávok közötti átmenetek okozzák, melyben a Dirac pont közelségének kitüntetett szerepe van.

-Physical Review Letters accepted for publication (2012)-

(v) Króm oxid alapú  $\text{ACr}_2\text{O}_4$  ( $\text{A}=\text{Co,Fe,Cu}$ ) kristályok optikai fonon gerjesztéseinek vizsgálatával megmutattuk, hogy a magas hőmérsékleti paramágneses fázisból a bonyolult mágneses renddel bíró alapállapotba való átalakulásuk során a kristályrács szimmetriája ortorombosra csökken. Ezen rendszerekben, az erős spin-fonon kölcsönhatás miatt, ennek kiváló indikátora a fonon módusok felhasadása. Polarizáció érzékeny optikai méréseink azt is megerősítik, hogy a szimmetria csökkenés sztatikus értelemben valósul meg.

-Physical Review Letters 103, 077205 (2009)-

Korábbi kutatásainkat kiterjesztve újabb krómoxid alapú spinellek ( $\text{ACr}_2\text{O}_4$ , ahol  $\text{A}=\text{Ni, Mn}$ ) magnetoelaszticitását vizsgáltuk az infravörös aktív rácsrezgések felhasadásának analízisével a mágneses fázisátalakulás során. Az eredmények megerősítették korábbi megfigyelésünket, miszerint az A rácshelyen ülő ion köbös fázisbeli pályadegenerációja a magnetoelaszticitás feltétele. Jelenleg ezen hipotézis mikroszkopikus modellel történő alátámasztásán dolgozunk elméleti kollégákkal együttműködve.

(vi) Multiferro (egyszerre mágneses és ferroelektromos polarizációval rendelkező) anyagok optikai vizsgálata. Ennek keretében kutattuk  $\text{Ba}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$  könnyű síkú antiferromágnes esetén a dinamikus (optikai) magnetoelektromos effektus megjelenését a spingerjesztések tartományában. Az anyag alapállapotú multiferro fázisában óriási irányfüggő dikroizmust tapasztaltunk. Azt találtuk, hogy spingerjesztésekkel rezonanciában lévő energiájú fény abszorpciója egymással

szemben haladó, lineárisan polarizált nyalábok esetén 50%-kal különböző. Megmutattuk, hogy ez az irányfüggő dikroizmus mágneses térrel manipulálható.

-Physical Review Letters 106, 057403 (2011)-

(vii) A mágnesesen rendezett fázis szimmetria-analízisével megjósoltuk, hogy  $Ba_2CoGe_2O_7$  esetén külső mágneses tér megfelelő irányú alkalmazása esetén királissá tehető az anyag és a mágneses tér elforgatásával a jobb és bal kezes módosulat (enantiomer) között kapcsolgathatunk. Ezt meg is figyeltük a magnongerjesztések által mutatott természetes optikai aktivitásban. Ezen kívül 90%-ot elérő magnetokirális dikroizmust tapasztaltunk, ami az irányfüggő dikroizmus másik fajtája és mindaddig 0.1% volt a legnagyobb megfigyelt effektus. Azt jósoljuk, hogy hasonlóan erős optikai anizotrópiák jelen vannak számos mágneses kristályban, melyek nem rendelkeznek inverziós szimmetriával.

-Nature Physics published online, DOI: 10.1038/NPHYS2387-

(viii) Vizsgáltuk a spinek kollektív dinamikáját rendezett mágneses szerkezettel bíró szigetelő anyagokban, ahol a mágneses kölcsönhatások erős anizotrópiát mutatnak.  $Ba_2CoGe_2O_7$  esetén azt találtuk, az anizotrópia hatására a spin gerjesztési spektrumban új, nem konvencionális magnon ágak jelennek meg. Ezek a spinhullám gerjesztések az inverziós szimmetria hiányának köszönhetően nem csak a fény mágneses, hanem elektromos komponensével is képesek kölcsönhatni.

-Physical Review Letters 108, 257203 (2012)-

(ix) A Magyar Tudomány megkeresésére áttekintő cikket írtam a magneto-optikai spektroszkópia széleskörű alkalmazásáról a modern anyagtudományban, melyben számos ponton kapcsolódó eredményeinket használtam illusztrciónak. Bár a cikk lényegében a projekt témakörét ismerteti, a folyóirat jellegéből adódóan pályázati forrásokból származó támogatás feltüntetésére nem nyílt lehetőség.

-Magyar Tudomány 2009/7 p. 866-

(x) A szervesetlen mágneses kristályok vizsgálatán túl komoly hangsúlyt kapott egy biológiai téma, a malária magneto-optikai diagnosztikája. Kísérleti eredményeink megmutatták, hogy a maláriapigmentet alkotó kristályok specifikus alakjának és mágneses anizotrópiájának köszönhetően a mágnesesen indukált lineáris kettőstörés/dikroizmus mérése igen érzékeny diagnosztikai módszerré válhat malariafertőzés kimutatására. Ezen túlmenően mérési eredményeink részletes analízisével számos alapvető tulajdonságát tártuk föl a maláriapigmentnek, mely tudás komolyan előremozdíthatja a maláriakutatás orvosi-biológiai vonalát is. Az eredmények publikálásán túl célunk egy klinikai diagnosztikában használható, kompakt és a lehetőségekhez mérten olcsó malariafertőzést vizsgáló készülék prototípusának kifejlesztése.

-submitted to Nature Communications-

A projekt keretében, az esetek jelentős részében nemzetközi együttműködésben elért eredmények 11 folyóiratcikkben lettek közzétéve v. kerültek elfogadásra, többségében igen rangos újságokban (1 Nature Physics, 7 Physical Review Letters). Kumulatív impakt faktoruk 72. További egy cikk a Nature Communications-höz került benyújtásra.

A fenti témákban végzett kutatómunkával Bordács Sándor PhD fokozatot, Kocsis Vilmos, Szaller Dávid, Butykai Ádám és Orbán Ágnes pedig MSc diplomát szerzett. Ezen felül eredményeikkel igen sikeresen szerepeltek nemzetközi konferenciákon illetve TDK-n és OTDK-n:

-Butykai Ádám: Malária fertőzés diagnózisa mágnesesen indukált dikroizmus révén, BME TDK (Kísérleti fizika szekció) 1. díj, rektori különdíj; SE TDK (Biofizika szekció) 2. díj; OTDK (Biofizika szekció) 2. Díj

-Kocsis Vilmos: Szimmetria és rácsdinamika kapcsolata spinell kristályokban, BME TDK (Anyagtudomány szekció) 1. Díj

-Orbán Ágnes: UDE fehérje szerkezetének vizsgálata cirkuláris dikroizmus spektroszkópiával, BME TDK (Kísérleti fizika szekció) 2. díj; OTDK (Biofizika szekció) 3. Díj

-Szaller Dávid: GaV4S8 elektronszerkezetének vizsgálata optikai spektroszkópiával, BME TDK (Anyagtudomány szekció) 2. díj; OTDK (Szilárdtestfizika szekció) 2. díj

Budapest, 2012. augusztus 29.

Kézsmárki István  
vezető kutató