

Magyar–német (TKA–DAAD) kutatócsere projekt

Záró beszámoló

A projekt adatai:

Nyilvántartási szám: 152294

Projektcím: Néel-típusú skyrmionok statikus és dinamikus tulajdonságai a multiferroikus lyukas spinell anyagokban

Magyar projektvezető neve: Dr. Kézsmárki István

Magyar intézmény neve: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Német projektvezető neve: Prof. Lukas M. Eng, Dr. Peter Milde

Német intézmény neve: TU Dresden

Támogatási időszak: 2017–2018

A. A projektidőszakban elvégzett munka összefoglalása (max. 2 oldal)

A projekt során szoros együttműködést folytattunk a TU Dresden kutatóival a Néel-típusú skyrmionok vizsgálatában, melyeket az ún. lyukas spinell szerkezetű kristályok anyagcsaládjába tartozó három új kristályban tanulmányoztunk. A drezdai kutatócsoport felületi pásztázó mikroszkópiás méréseket végzett a GaV_4S_8 , GaV_4Se_8 és GaMo_4S_8 kristályokon. Ezen kísérletekhez több alkalommal csatlakoztak a magyar kutatócsoport tagjai, Butykai Ádám (PhD hallgató), valamint Balogh László (mesterszakos hallgató). A közös kísérletek helyszíne és időpontjai időrendben:

- Rosendorf, HZDR kutatóközpont FEL laboratórium: 2017.07.10–14. Résztvevő: Butykai Ádám. Kísérletek célja: A GaV_4S_8 szerkezeti doménstruktúrájának megváltoztatása intenzív CO_2 lézerefény elektromos terével.
- TU Dresden, 2017.11.20–24. Résztvevők: Butykai Ádám és Balogh László. Kísérletek célja: Mágneses erő mikroszkópia (MFM) mérések a GaV_4Se_8 mágneses szerkezeteinek feltérképezésére
- TU Dresden, 2018.04.15–27. Résztvevő: Balogh László. Kísérletek célja: Piezoelektromos erő mikroszkópia (PFM) mérések a GaV_4Se_8 szerkezeti doménjeinek feltérképezésére.

Az együttműködés során kiépült kapcsolat révén Balogh László másfél hónapos nyári gyakorlatát szintén a TU Dresden egyetemen töltötte egy másik kutatócsoportnál, ahol Lorentz-elektronmikroszkópiás méréseket végzett Dr. Axel Lubk laboratóriumában a lyukas spinell anyagokban fellépő mágneses szerkezetek valós térbeli vizsgálatához.

A fenti kísérleteken túlmenően több alkalommal tartottunk közös workshopokat a német partnerekkel, valamint a német féllel egy másik DAAD kétoldali kutatócsere projekt keretében együttműködő cseh kutatócsoporttal (Dr. Jiri Hlinka). A konferenciák időrendben:

- Drezda, 2017. március 19–24.
magyar résztvevők: Kézsmárki István, Bordács Sándor, Butykai Ádám, Farkas Dániel Gergely, Szigeti Bertalan György
német résztvevők: Lukas M. Eng, Susanne C. Kehr, Peter Milde, Erik Neuber, Jonathan Döring, Tobias Nörenberg
- Prága, 2017. június 6–8. (nem DAAD forrásból finanszírozva)
magyar résztvevők: Kézsmárki István és Butykai Ádám
német résztvevők: Lukas M. Eng, Susanne C. Kehr, Peter Milde, Erik Neuber, Jonathan Döring, Tobias Nörenberg
- Kouty, Csehország, 2018. május 21–25. (nem DAAD forrásból finanszírozva)
magyar résztvevők: Bordács Sándor, Butykai Ádám, Kézsmárki István
német résztvevők: Peter Milde, Susanne C. Kehr, Tobias Nörenberg
- Budapest, 2018.11.17.
magyar résztvevők: Bordács Sándor, Butykai Ádám, Farkas Dániel Gergely, Szigeti Bertalan György
drezdai résztvevők: Peter Milde, Dmytro Ivaneiko

Ezen konferenciákon a német, cseh és magyar kutatók előadták a lyukas spinell kristályokon végzett legújabb kísérletek, illetve elméleti számítások eredményeit, valamint egyeztették a jövőbeni kutatás irányvonalát. A személyes találkozókon túl a felek folyamatos kapcsolatban álltak, online levelezések és virtuális konferenciák révén.

B. A közös projekt eredményei (max. 2 oldal)

A lyukas spinell kristályokban fellépő modulált mágneses struktúrák és a Néel-típusú skyrmion rács fázis vizsgálata két irányvonal mentén zajlott. A német kutatócsoport pásztázó mikroszkópiás méréseket végzett a jelölt anyagokon, melyekbe a magyar fél kutatói is bekapcsolódtak. Az együttműködési időszak alatt ezen kísérletekből jelentős eredmények születtek, melyeket két publikációban tettünk közzé:

A drezdai kutatók kifejlesztettek egy alacsonyhőmérsékletű infravörös közeltér pásztázó mikroszkópot [D. Lang et al. Rev. Sci. Instr. **89**, 033802, (2018)], melynek validálásához a GaV₄S₈ kristályban fellépő ferroelektromos fázisátalakulást használták fel. Közösén végzett kísérleteink során megmutattuk, hogy az intenzív infravörös lézerefény a folyékony héliummal hűtött mintát a ferroelektromos fázisátalakulás hőmérséklete fölé fűti, melynek során a ferroelektromos domének eltűnnek. A doménszerkezet a lézerefény megszüntetése után spontán módon alakul újra. A ferroelektromos doménszerkezetet PFM-mel pásztázva a lézer által közölt fűtő teljesítmény kalibrálható.

Továbbá, a TU Dresden laboratóriumában pásztázó mikroszkópiás méréseket végeztek GaMo_4S_8 egykristály (111) felületén. Az egyidejű AFM (atomerő mikroszkópia), PFM és KPFM (Kelvin-erő mikroszkópia) mérések alapján egyértelműen rekonstruáltuk a ferroelektromos doménszerkezetet a vizsgált felületen [E. Neuber *et al.* J.Phys.Condens.Matter, **30**, 445402 (2018)]. A mérések alapján megállapítottuk, hogy az elsődleges ferroelektromos doménfalak elektromosan semlegesek, azonban felületi polarizációs töltés jelenhet meg a másodlagos doménfalakon. A mérésekből kiderül továbbá, hogy ezen anyagban fellépő strukturális domének mérettartománya a GaV_4S_8 -ban megfigyelteknél kb. egy nagyságrenddel kisebb. A szerkezeti domének kb. 10–100nm vastagságúak, mely az anyagban fellépő mágneses struktúrák nagyságrendjébe (~10nm) esik. A keskeny doménméret geometriai megszorítást okozhat a mágneses struktúrákra nézve, melynek nagy szerepe lehet az anyagban megfigyelt mágneses fázisdiagram komplex szerkezetének kialakulásában.

A felületi mikroszkópiás mérésekkel párhuzamosan a magyar kutatócsoport a GaV_4S_8 testvér vegyületeinek, a GaV_4Se_8 és a GaMo_4S_8 kristályoknak a tömbi tulajdonságait vizsgálta mágneszettség és kisszögű neutronsórási kísérletekkel. Eredményeinket három publikáció foglalja össze, továbbá jelenleg két újabb kézirat készül:

A GaV_4Se_8 kristályokon sikeresen hajtottunk végre piroelektromos és magnetoelektromos méréseket, amelyek alapján kimutattuk a strukturális [E. Ruff *et al.*, PRB, **96**, 165119, (2017)] és mágneses fázisátalakulásokat az anyagban és feltérképeztük a mágneses fázisdiagramot [S. Bordács *et al.* Sci. Rep., **7**, 7584, (2017)]. Eredményeinkből kiderül, hogy ezen anyagban a skyrmion fázis jelentősen kiterjedtebb, mint a GaV_4S_8 -ban, ami feltehetőleg a mágneses vanádium atomokat körülvevő, a kénél kisebb elektronegativitású szelén atomok következtében fellépő gyengébb, ellentétes előjelű mágneses anizotrópiának köszönhető. Az anyagon végzett magnetoelektromos mérések, a kisszögű neutronsórási kísérleteink, valamint az Augsburgi Egyetem kutatóinak mágneszettség és magnetopolarizációs méréseinek egybehangzó tanúsága szerint a modulált mágneses fázisok a 19K-en megvalósuló mágneses rendeződés hőmérséklete alatt a legalacsonyabb vizsgált hőmérsékletekig (2K) termodinamikailag stabilak, amely ezidáig egyedülálló a skyrmion fázist tartalmazó anyagok között. Ezen túlmenően kimutattuk, hogy a modulált fázisok a külső mágneses térben is rendkívül robusztusak, mintegy 500mT-ig fennmaradnak, szemben a GaV_4S_8 -ban megfigyelt ~60mT kritikus térértékekkel. Ezen tapasztalatok alapján azonosítottuk azon anyagi tulajdonságokat, amelyek lehetővé teszik a kiterjedt skyrmion fázis megjelenését poláris.

Kisszögű neutronsórási kísérleteket végeztünk a GaV_4S_8 -on, melynek során meghatároztuk a mágneses modulációvektorok reciproktérbeli szerkezetét [J. S. White *et al.*, PRB, **97**, 020401, (2018)]. Kísérletileg bizonyítottuk, hogy a mágneses modulációk szerkezete valóban cikloidális, azaz Néel-típusú.

Továbbá, a GaMo_4S_8 -on végzett mágnesezettség méréseink alapján meghatároztuk ezen legújabb anyag mágneses fázisdiagramját, és a mágnesezettséget a kissetű neutronszerzés kísérleteink eredményeivel összevetve elkülönítettük az egyes strukturális doménekben végbemenő fázisátalakulásokat. Hasonlóan a GaV_4Se_8 modulált mágneses fázisaihoz, azok a legalacsonyabb hőmérsékletig stabilak. A mágneses fázisok a GaV_4Se_8 -ben megfigyelnél is robusztusabbak a mágneses térrel szemben, annak irányától függően akár 1.5–2T tértartományig is fennmaradnak. Végül, meghatároztuk a mágneses modulációk reciproktérbeli elrendeződését, mely némiben eltér a GaV_4S_8 -ban tapasztalt szerkezettől. A fenti kísérletek egybehangzó tanúsága szerint a GaMo_4S_8 -ban fellépő spin-pálya kölcsönhatás jelentősen erősebb, mint a testvér vegyületeiben, a nehezebb mágneses Mo atomoknak köszönhetően. Eredményeinket a közeljövőben tervezzük publikálni.

C. Az együttműködés további szempontjai: (max. 3 oldal)

1. Mennyiben alapulnak a projekt elért eredményei a német–magyar együttműködésen?

A német fél által végzett felületi mikroszkópiás mérésekben több alkalommal részt vettek magyar kutatók is, valamint aktívan hozzájárultak az eredmények interpretációjához. A négy alkalommal megrendezett workshopok alkalmával közösen diszkutáltuk a két kutatócsoport eredményeit, és azok fényében egyeztettük a kutatás fő irányvonalait.

2. Hogyan befolyásolta a támogatás a projekt előmenetelét?

A támogatásból fedeztük a magyar kutatók utazását és napidíját a drezdai kísérletek és találkozók alkalmával. A német partnerek egy alkalommal látogattak Budapestre egy cseh–német–magyar találkozó alkalmával. A támogatás nagyban motiválta a kísérletek, valamint a találkozók létrejöttét.

3. Hogyan csatlakozott a második évi munka az első év eredményeihez?

Az első évben biztató eredmények születtek mind a felületi, mind pedig a tömbi kísérletek révén. A 2018-as év hozadéka ezen eredmények diszkussziója, publikálása, valamint a felmerülő kérdések alapján a kísérletek folytatása volt.

4. Milyen szempontból volt jelentős a projekt a fiatal kutatók tapasztalatszerzése, szakmai fejlődése szempontjából?

Általánosan igaz, hogy a projekt nagyban motiválta a fiatal kutatók külföldi tapasztalatszerzését, a kapcsolatépítést, valamint a konferenciák alkalmával az eredmények prezentálását idegen nyelven. A projekt kifejezetten nagy fontossággal bírt Balogh László mesterszakos hallgató számára, aki a 2018-as évben új résztvevőként csatlakozott a projekthez. A 2019-es évben beadandó MSc diplomamunkájának alapját

javarészt a németországban végzett kísérletek eredményei képezik majd.

Sorolja fel azokat a hazai vagy külföldi tudományos közleményeket és publikációkat, amelyek az együttműködés eredményeként jelentek meg!

Az együttműködési időszak alatt az alábbi tudományos közlemények jelentek meg a pályázatban foglalt célkitűzéseink eredményeként:

- E. Neuber *et al.*, J.Phys.Condens.Matter, **30**, 445402 (2018)
- D. Lang *et al.*, Rev. Sci. Instr. **89**, 033802, (2018)
- J. S. White *et al.*, PRB, **97**, 020401, (2018)
- S. Bordács *et al.*, Sci. Rep., **7**, 7584, (2017)
- E. Ruff *et al.*, PRB, **96**, 165119, (2017)

Továbbá, 2018-ban elkészült Erik Neuber (TU Dresden) és Butykai Ádám (BME) PhD értekezése, melyek nagyban támaszkodnak a közösen elvégzett kísérletek eredményeire.

5. Milyen akadályokat vagy problémákat érzékelt a projekt végrehajtása során?

–

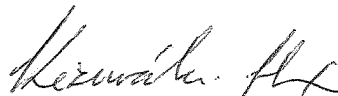
- **Mi a legjelentősebb szakmai eredmény, amit kiemelné a projektegyüttműködés kapcsán?**

A GaMo₄S₈ anyag doménszerkezetének részletes felületi mikroszkópiás analízise [E. Neuber *et al.*, J.Phys.Condens.Matter, **30**, 445402 (2018), valamint a mágnesezettség és neutronszórás eredmények értelmezése [Á. Butykai *et al.*, kézirat benyújtás előtt].

6. Van-e olyan javaslat, amivel módosítaná a pályázati felhívás és végrehajtás szempontjait a jövőre nézve?

–

Kelt: Budapest, 2018.12.06



Dr. Kézsmárki István, egyetemi tanár
témavezető