



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

II. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2017ko maiatzaren 10, 11 eta 12
Iruñea, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

ZIENTZIAK ETA NATURA ZIENTZIAK

**Frustrazioa, egitura eta propietate
konplexuen jatorria**

*Irene Urcelay Olabarria,
José Luis García Muñoz,
Eric Ressouche eta Vassil Skumryev*

177-183 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.ii.05.26>

ANTOLATZAILEA:



ELKARLANEAN:



LAGUNTZAILEAK:



Frustrazioa, egitura eta propietate konplexuen jatorria

I. Urcelay-Olabarria¹ eta J. L. García-Muñoz²

E. Ressouche³ eta V. Skumryev⁴

¹ Fisika Aplikatua I Saila, Bilboko Ingenieritza Eskola (UPV-EHU), Urkixo Zumarkalea z/g. 48013 - Bilbao

² Institut de Ciencia de Materiales de Barcelona, ICMAB-CSIC, Campus universitari de Bellaterra, E-08193 Bellaterra, Spain

³ SPSMS, UMR-E CEA/UJF-Grenoble 1, INAC, Grenoble F-38054, France

⁴ Departament de Física, Universitat Autònoma de Barcelona, E-08193 Bellaterra, Spain

Laburpena

Atomoen arteko elkarrekintza magnetiko guztiak aldiberean bete daitezkeenean materialeko momentu magnetikoek egitura *simple* eta egonkorra lortzen dute. Baina beste zenbaitetan, atomoen arteko elkarrekintza magnetiko guztiak ezin dira aldiberean bete eta, ondorioz, indar guztien arteko oreka lortzeko egitura konplexuak eraikitzen dituzte momentu magnetikoek. Egitura horiek, askotan, materialetan agertzen diren fenomeno fisikoen jatorrian daude, multiferroizitatea, besteak beste. Gehienetan kanpo eremuen edota ordezkapen kimikoen bidez alda daiteke egitura magnetiko horien egonkortasuna eta baita ere horri lotuta agertzen diren propietate fisikoena, materialaren ezaugarri fisikoak moldatuz.

Hitz gakoak: frustrazio magnetikoa, egitura magnetikoak, truke-konstantea

Abstract

Usually the magnetic interaction between the atoms in a material can be satisfied simultaneously giving rise to rather simple magnetic structures. Nevertheless, in some materials this is not the case and it may lead to complex structures. These complex structures are very often in the base of the physical phenomena appearing in the material, such as multiferroicity. The subtle balance between the magnetic interaction can be modified by external fields or chemical substitution, giving rise to new magnetic structures and new properties.

Keywords: magnetic frustration, magnetic structures, exchange coupling constant

1 Sarrera eta motibazioa

Materiaren izaera kuantikoaren ondorio zuzena da magnetismoa: spinak eta Pauliren eskusio-printzipioa¹ dira magnetismoaren oinarri. Hurrengo Hamiltondarraren² bektore propioa da magnetikoki ordenatuta dagoen egoera:

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_{Coulomb} + \mathcal{H}_{S-O} + \mathcal{H}_{Kristal eremua} \quad (1)$$

adierazpen horretan $\mathcal{H}_{Coulomb}$ atalak Coulomb-en elkarrekintza kontuan hartzen du, \mathcal{H}_{S-O} elektroien spinaren eta elektroia kokatzen den orbitaren arteko elkarrekintza da eta $\mathcal{H}_{Kristal eremua}$ atalak egitura kristalinoaren eragina adierazten du. Heisenberg-en ereduaren erabiliz, Hamiltondar osoa, \mathcal{H} , modu errazagoan adieraz daiteke, \mathbf{S}_i eta \mathbf{S}_j spinen funtzioan, honako era honetan:

$$\mathcal{H} = \sum_{ij} J_{ij} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j. \quad (2)$$

Adierazpen horretako J_{ij} da \mathbf{S}_i eta \mathbf{S}_j spinen arteko truke-konstantea. Spinaren arteko elkarrekintzaren intentsitatearen neurria da truke-konstantea. Elkarrekintza ferromagnetikoa denean $J_{ij} > 0$ betetzen

¹Sistema bereko bi elektroik ezin dituzte zenbaki kuantiko guztiak berdinak eduki.

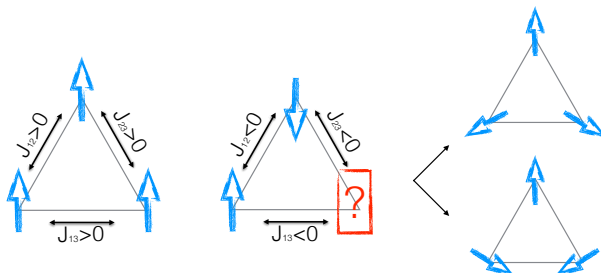
²Sistemaren energia osoari dagokion eragile matematikoa da.

da eta spinak konfigurazio paraleloan lerrotatzen dira; elkarrekintza antiferromagnetikoa denean, ordea, $J_{ij} < 0$ betetzen da eta spinak konfigurazio antiparaleloan lerrotatzen dira.

Magnetikoki frustratuta dauden materialetan ezin dira elkarrekintza magnetiko guztiak aldeberean bete (Chalker, 2011). Teknikoki esanda, Hamiltondarrean parte hartzen duten elkarrekintzek energia-ren minimoren balioa egoera bakarrean lortzea ekiditen dute. Era horretan, energia minimoko hainbat konfigurazio dago, hau da, egoera endakaturak da.

Hau guztia argitzeko adibide bat erabiliko dugu. Demagun triangelu eiteko spin-sarea daukagula eta J guztiek balio berbera dutela, ikus 1 Irudia. Elkarren ondoko spinen arteko elkarrekintza ferromagnetikoa bada, elkarrekintza guztiak bete daitezke. Baina $J < 0$ bada, elkarrekintza guztiak ezin daitezke bete aldeberean eta erdibideko egitura lortu behar du sistemak. Gainera, energia minimoa egiten duten spin-konfigurazio bakarra baino gehiago egon daitezke, ikus 1 Irudia.

1 Irudia: Spin-sarea da frustrazioaren jatorria, spin guztien arteko elkarrekintza berdina izanik. (Chalker, 2011) erreferentziatik egokitua. $J < 0$ bada, spin erpineko spinak ezin du beste bi spinekin elkarrekintza antiferromagnetikoa bete aldeberean.



Laurogeita hamargarren hamarkadan MnWO_4 materialaren egitura magnetikoak aztertu ziren, (Lautenschläger *et al.*, 1993). Hiru fase magnetiko ezberdin agertzen dira material horretan, ikus 2 Irudia.

- AF3 ($13,5 \text{ K} < T < 12,5 \text{ K}$): momentu magnetikoak \hat{u} norabidearekiko paraleloak dira eta haien amplitudea sinusoidaliki modulaturatuta dago. Aipatutako \hat{u} norabidea ac planoan dago, a ardatzetik $\sim 35^\circ$ ra.
- AF2 ($12,5 \text{ K} < T < 6,8 \text{ K}$): egitura magnetikoak \hat{u} eta \hat{b} osagaiak ditu, desfasetuta biak. Horren ondorioz, egitura magnetikoa ub planoan biratzen duen zikloide eliptikoa da.
- AF1 ($T < 6,8 \text{ K}$): \hat{b} osagaia desagertzen da eta momentu guztiak \hat{u} norabidearekiko paraleloak dira, $++--$ erako egitura osatuz.

Hiru egitura magnetikoen horien artean, AF2 egitura bereziki interesgarria da, magnetikoki ordenatuta egoteaz gain ferroelektrikoa baita, (Arkenbout *et al.*, 2006). Kristalaren b ardatzarekiko paralelo agertzen da polarizazio elektrikoa. Beraz, magnetikoki ordenatuta eta ferroelektrikoa izanik, fase horri multiferroiko deritzo.

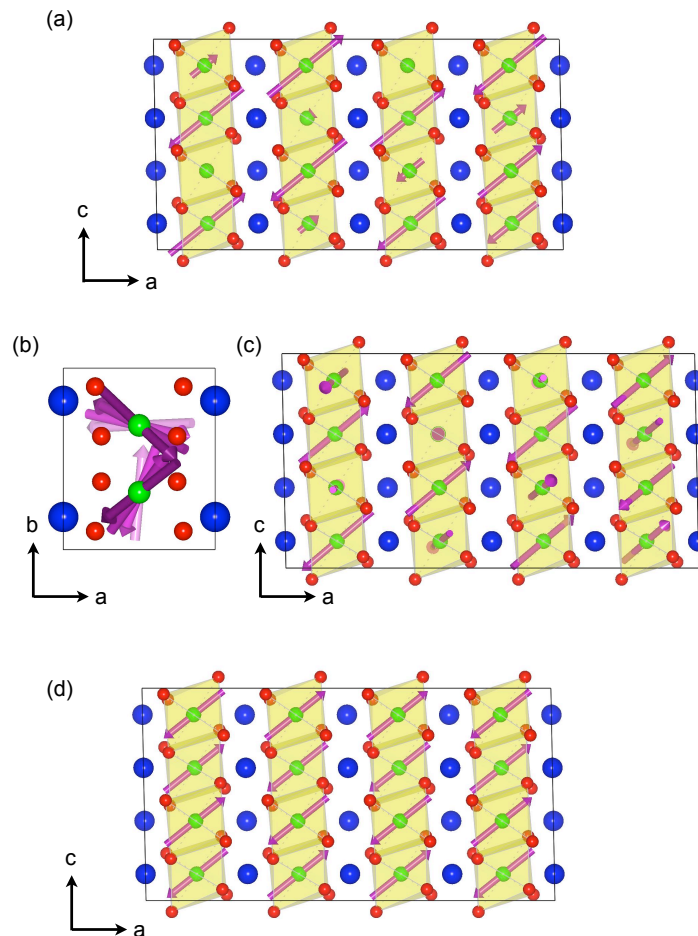
Egitura magnetiko segida honen jatorria elkarrekintza magnetikoen arteko lehian dago, frustrazio magnetikoa sorrarazten duena, (Ye *et al.*, 2011). Elkarrekintzen arteko lehia horren handia da material honetan kanpoko eremuek (tenperaturak, eremu magnetikoak...) edota ordezkapen kimikoak oreka hori apurtu eta beste egitura magnetiko bat ezar dezaketela materialean, eta horrekin lotuta dauden beste propietate fisikoak ere aldatzen direla, kasu honetan polarizazio elektrikoa.

Hurrengo lan honetan tenperaturak eta ordezkapen kimikoak MnWO_4 konposatuaren fase magnetikoetan eta propietate elektrikoetan duten eragina ikusiko dugu.

2 Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Ye *et al.* taldeko kideek 2011. urtean, neutroien sakabanatze inelastikoaren bidez frogatu zuten MnWO_4 konposatuan gertatzen den frustrazio magnetikoa. Konposatuko ioi magnetikoek, Mn^{2+} ek, kristalaren c ardatzean kateak eratzen dituzte, 3 Irudia. Irudi horretan kolore ezberdinez adierazita daude Ye *et al.*

2 Irudia: (a) AF3 egitura magnetikoaren proiektzioa ac planoan. (b) eta (c) AF2 egituraren proiektzioa ab eta ac planoetan, hurrenez hurren. (d) AF1 egitura magnetikoaren proiektzioa ac planoan.



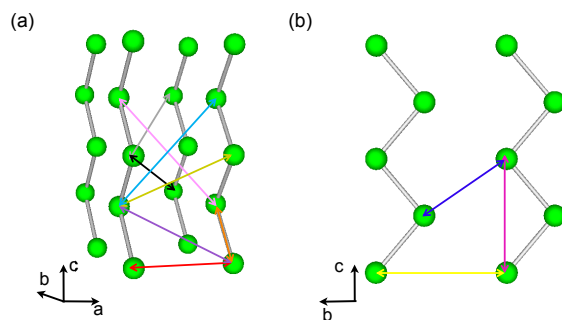
taldeak aztertutako elkarrekintza magnetikoak. Lortu zituzten J guztien balioak 1 Taulan daude. Haien emaitzen arabera bost J nagusi daude (J_1 , J_3 , J_4 , J_6 eta J_9) eta hauek elkarrekintza antiferromagnetikoa impositzen dute tartean sartzen dituzten atomoen artean. Imposaketa horiek ezin dira aldiberean bete eta, ondorioz, egitura frustratu egiten da. Hori dela eta spin-konfigurazio ugari eta konplexuak (AF1, AF2, AF3) agertzen dira materialean tenperatura ezberdinetan.

1 Taula: Atomoen arteko distantziak eta J konstanteen balioak, (Ye *et al.*, 2011).

Mn-Mn	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
Dist.	3.286	4.398	4.830	4.990	5.760	5.801
Intents.	-0.42(1)	-0.04(1)	-0.32(1)	-0.26(1)	0.05(1)	-0.43(1)
	J_7	J_8	J_9	J_{10}	J_{11}	
Dist.	5.883	6.496	6.569	6.875	7.013	
Intents.	-0.12(1)	0.02(1)	-0.26(1)	-0.15(1)	0.02(1)	

Hainbat ioi ezberdinekin dopatu eta aztertu izan da MnWO_4 (Pullar *et al.*, 2007; Chaudhury *et al.*, 2008; Ye *et al.*, 2008; Chaudhury *et al.*, 2009; Meddar *et al.*, 2012; Chaudhury *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2009). Song *et al.* taldekideek ikusi zuten Mn^{2+} ioiak Co^{2+} ioiez ordezkatzuz fase multiferroikoa tenperatura oso baxuetan ere egonkortzen dela eta AF3-AF2 faseen arteko trantsizio-tenperatura ez dela asko bajatzen. Beraz, ioi-ordezkapen horrek AF2 egitura egonkortzen du tenperatura baxuetan. Gaine-

3 Irudia: Manganeso ioiek sortzen dituzten kateen bi proiektzio. Koloreek manganeso bikoteak bereizteko erabili dira. Kolore kode berbera erabili da 1 Taulan.



ra, haien datuen arabera % 10 kobaltodun materialean fase magnetiko berriak agertzen ziren baina ez zituzten horiek deskribatzeko datu nahikoa. Haien aurretiazko fase-diagrama aurkeztu zuten, trantsizio-tenperatura definituekin baina faseak deskribatu gabekoa.

Lan honen helburua kobalto-ordezkapenak MnWO_4 konposatuaren magnetismoan eta propietate elektrikoetan sortzen dituen aldaketak aztertzea da.

3 Ikerketaren muina eta ondorioak

Neutroien ezaugarriak direla eta, masa, neutraltasun elektrikoa eta spina, tresna ezinhobeak dira materialen egitura magnetikoa aztertzeko. Masak, uhin-luzera aproposa ematen die neutroiei difrakzioa gerta dadin material kristalinoan. Neutraltasun elektrikoa dela eta neutroiak materialaren barrena sar daitezke eta bolumen osoko informazioa lortu. Eta azkenik, neutroiek spina daukatenez, materialeko momentu magnetikoa *ikus* dezakete eta egitura magnetiko ordenatua azter daiteke. Beraz, spin-konfigurazioak deskribatzeko neutroien bidezko difrakzioko esperimenduak egin dira kristal bakarretan.

Egitura magnetiko guztiak sistemaren simetria osoa kontuan hartuta ikertu dira. Metodologiaren deskribapen zehatza (Urcelay-Olabarria *et al.*, 2013) erreferentzian aurki daiteke. Metodo hau erabilia, jadanik ezagutzen ziren MnWO_4 konposatuaren AF2 eta AF3 egitura magnetikoen detaile oso inportanteak aukitu ditugu eta, gainera, materialen propietate elektrikoak aurrerata ahalbidetu digu, gero neurtu eta baieztatu direnak. Propietate elektrikoak baieztatzeke korrante piroelektrikoa neurtu da.

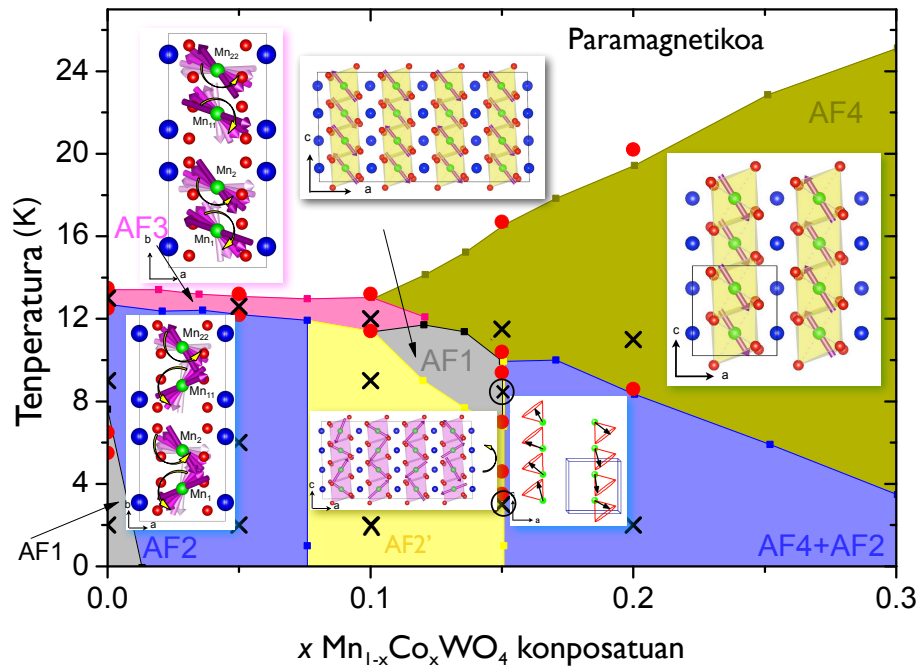
$\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{WO}_4$ familiako $x = 0, 0.05, 0.10, 0.15$ eta 0.20 konposatuak ikertu dira eta emaitzekin 4 eta 5 Irudietako fase-diagramak eraiki dira, (Urcelay-Olabarria *et al.*, 2013, 2012a,c,b; Urcelay-Olabarria, 2013).

Fase magnetikoen $x - T$ diagraman xehetasun batzuk gehitu dizkiegu MnWO_4 konposatuaren egitura konmentsuraezinei, (Urcelay-Olabarria *et al.*, 2013):

- AF3 fasean momentu magnetikoak ez dira kolinealak (Lautenschläger *et al.* (1993) erreferentzian esaten den bezala), badute b ardatzarekiko paraleloa den osagai bat. Hori dela eta, egitura eliptikoa irudikatzen dute spinek. Baina egiturak badu berezitasun bat: gelaxka-unitatean dauden bi manganesoei dagozkien elipseak ez dira independenteak, bata bestearekin erlazionatuta dago. Erlazio horren ondorioz, bien kiralitatea, hau da, spinen biraketa norabidea, aurkakoa da eta horrek egitura apolarra izatea dakar. Hau da, ez da polarizazio elektriko makroskopikorik ageriko materialean.
- AF2 fasean ordea bi elipse horiek halaberrez independenteak izan behar dira eta kiralitate berdina daukate. Horrek polarizazio elektrikoa b ardatzean egotera behartzen du.

Lagineko manganesoaren %10 kobaltor ordezkatzean AF2 fasea desagertu egiten da eta kualitatiboki oso antzerakoa den AF2' fasea agertzen da (Urcelay-Olabarria *et al.*, 2012c). Honen simetria, ordea, guztiz ezberdina da eta ez du polarizazio elektrikoa b ardatzean egotetik uzten. Polarizazio elektrikoa ac planoan egotera behartuta dago. Momentu magnetikoei dagokienez, gelaxka-unitatean dauden bi manganesoei dagozkien elipseak guztiz erlazionatuta daude eta kiralitate berdina daukate. Kasu honetan elipsea ac planotik oso gertu dago kokatuta.

4 Irudia: $x - T$ fase-diagrama: fase magnetikoen funtzioan (egitura magnetiko bakoitzaren eskemarekin).



$Mn_{0.85}Co_{0.15}WO_4$ konposatuaren kasuan egitura magnetikoak deskribatzea oso zaila izan da, faseen arteko koexistentzia gertatzen baita, (Urcelay-Olabarria, 2013). Lagin honetan hain da handia frustrazio magnetikoa, ez dela egitura bakarra egonkortzen eta horrek analisisa erabat oztopatzen du. Hala ere, fase-trantsizioak detektatu ahal izan ziren, horiek 4 Irudiko fase-diagraman puntu gorritz adierazita daude.

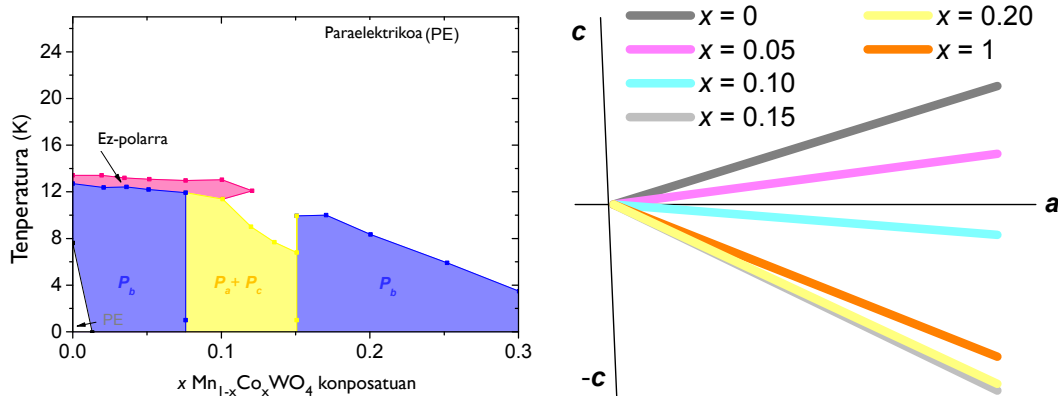
Kobalto kontsentratio handiagoetan egitura guztiz berri bat aurkitu da: egitura magnetiko koniko antiferromagnetikoa. Koniken arteko erlazioa AF2 egituraren oso antzerakoa da eta, ondorioz, egitura honek ere polarizazioa b ardatzean egotera behartzen du.

Detale hauek azterketa egiterakoan simetria osoa kontuan hartu dugulako lortu ditugu. Konposatu hauetan egitura magnetikoa da simetria apurtzen duena eta era horretan polarizazio elektrikoa agertzea ahalbidetzen duena. Egitura kristalinoa aztertuko bagenu, ez genuke honen aldaketarik somatuko fase-trantsizioetan eta, ondorioz, ez ginatke jabetuko egitura ez-polar bat eduki beharrean zenbait kasutan egitura polarrak ditugula (fase multiferroikoetan). Hori dela eta, behin egitura magnetikoak aztertuta eta simetria osoa zein den determinatuta aurrean daiteke polarizazioaren norabidea zein izan daitekeen eta polarizazioaren fase-diagrama osatu, ikus 5 Irudia. Neurketa esperimentalen bitartez baieztatu dira fase-diagrama honetan aurrean ziren polarizazio elektrikoaren norabideak fase multiferroikoetan (Urcelay-Olabarria, 2013).

Horrez gain, konposatu guztiei dagozkien ardatz magnetiko errazak determinatu ditugu. Momentu magnetikoak ardatz magnetiko errazaren norabidean lerrokatzeko joera daukate eta gure kasuan ardatz hori \hat{u} norabideak zehazten du. Horiek 5 Irudian ageri dira.

Laburbilduz, egiturak aztertzeke erabilitako metodologiaren bidez, hainbat xehetasun deskribatu ahal izan ditugu ezagunak ziren AF2 eta AF3 faseetan. AF3 fasean momentu magnetikoak ez dira paraleloak baizik eta elipseak eratzen dituzte ub planoan. Gainera, gelaxka-unitateko manganesoen elipseen arteko erlazioa eta kiraltasuna ere zehaztu dira. AF2 fasearen kasuan bi elipseak guztiz independenteak dira baina biek kiraltasun berbera dute, horren ondorioz polarizazio elektrikoa b ardatzean agertzen da. Kobalto kopurua handitzen denean AF1 fasea desagertzen da eta AF2 modifikatu egiten da. Bere simetria aldatu egiten da eta polarizazio elektrikoa ac planoan agertzen da. Kobalto kontsentratio altuetan ($x > 0.15$) egitura koniko antiferromagnetikoa aurkitu da, multiferroikoa hau ere, eta AF3 fasea desagertu egiten da. Azken horren ordean antiferromagnetikoa den AF4 fasea agertzen da.

en funtzioan. Eskuman, ardatz magnetiko



Ikerketa honetan argi eta garbi ikusi dugu frustrazio magnetiko handiko sistema dugula esku artean, zeinetan aldaketak eragiten dizkiogunean oreka magnetiko berriak lortzen diren eta egitura magnetiko guztiz ezberdinak lortzen diren materialean. Egitura magnetiko horrekin erabat lotuta dagoen polarizazio elektrikoak ere aldaketa jasaten ditu elkarrekintza magnetikoek oreka berriak lortzen dituztenean.

Orokorrean esan daiteke, kobalto kopuru txikietan fase-diagrama oso aberatsa dela, frustrazio-maila handiaren adierazgarri ($x \sim 0.15$). Argi ikusten da, indar magnetikoen arteko oreka oso ezegonkorra dela eta kobalto kantitate aldaketa oso txikiekin guztiz ezberdinak diren konfigurazioak lortzen direla. Baina kobaltoaren presentzia handitzen den heinean, frustrazio hori txikitu eta egitura sinpleagoak agertzen dira, hau da, AF4 fase antiferromagnetiko klasikoa.

4 Etorkezinerako planteatzen den norabidea

Lan honetan materialean ordezkapen kimikoak, bereziki manganesoaren ordez kobaltoa sartzeak, eta temperatura aldaketak eragiten dituzten aldaketa makroskopikoak aztertu ditugu. Fase magnetikoetarako $x-T$ fase-diagrama eraiki dugu eta propietate elektrikoetarako $x-T$ fase-diagrama aurrean eta baieztatu dugu. Gainera, konposatu bakoitzaren ardatz magnetiko erraza aurkitu dugu.

Hala ere, oraindik badaude aztergai diren zenbait puntu. Horien artean:

- Ordezkapen kimikoak eta tenperaturak J elkarrekintza magnetikoa adierazten duten konstateetan duten eragina aztertzea. Hau da, mikroskopikoki zein aldaketa eman diren aztertzea: frustrazioa handitu/txikitu egiten da, zein norabidetan, ... Oso interesgarria litzateke %15-eko kobalto kopurua duen lagina aztertzea, horrek fase kopuru handien agertzen dituen baita, eta, beraz, frustrazio magnetiko handienekoa ere izango da.
- Beste kanpo eremuek izan dezaketen eragina aztertzea: eremu magnetikoak, eremu elektrikoak eta presioak, adibidez.

5 Eskerrak eta oharrak

- Idazleek eskertu nahi diote Institute Laue Langevin erakundeari bertan neutroien bidezko difrakzio esperimentuak bertan egiteko denbora eman zaielako.
- Lan hau "Magnetic order, spin-induced ferroelectricity and structural studies in $\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x\text{WO}_4$ " tesi lanetik eratorritakoa da, Urcelay-Olabarria (2013).

Erreferentziak

ARKENBOUT, A. H., T. T. M. PALSTRA, T. SIEGRIST, eta T. KIMURA. 2006. Ferroelectricity in the cycloidal spiral magnetic phase of mnwo_4 . *Phys. Rev. B* 74.

- CHALKER, JOHN T. 2011. *Introduction to Frustrated Magnetism, Materials, Experiments, Theory*. Springer Series in Solid-State Sciences.
- CHAUDHURY, R. P., B. LORENZ, Y. Q. WANG, Y. Y. SUN, eta C. W. CHU. 2008. Suppression and recovery of the ferroelectric phase in multiferroic mnwo4. *Phys. Rev. B* 77.
- , B. LORENZ, Y.-Q. WANG, Y. Y. SUN, eta C. W. CHU. 2009. Re-entrant ferroelectricity and the multiferroic phase diagram of mn1-xfexwo4. *New Journal of Physics* 11.
- , F. YE, FERNANDEZ-BACA, B. LORENZ, Y. Q. WANG, Y. Y. SUN, H. A. MOOK, eta C. W. CHU. 2011. Robust ferroelectric state in multiferroic mn1-xzxnwo4. *Phys. Rev. B* 83.
- LAUTENSCHLÄGER, G., WIETZEL H., VOGT T., R. HOCK, A. BÖHM, eta H. FUESS. 1993. Magnetic phase-transitions of mnwo4 studied by the use of neutron-diffraction. *Phys. Rev. B* 48.
- MEDDAR, L., M. JOSSE, P. DENIARD, C. LA, G. ANDRÉ, F. DAMAY, V. PETRICEK, S. JOBIC, M.-H. WHANGBO, M. MAGLIONE, eta C. PAYEN. 2012. Increasing the phase-transition temperatures in spin-frustrated multiferroic mnwo4 by mo doping. *Chemistry of Materials* 24.353–360.
- PULLAR, R.C., S. FARRAH, eta N. MCN. ALFORD. 2007. Mgwo4, znwo4, niwo4 and cowo4 microwave dielectric ceramics. *Journal of the European Ceramic Society* 27.1059–1063.
- SONG, Y.-S., J.-H. CHUNG, J. M. S. PARK, eta Y.-N. CHOI. 2009. Stabilization of the elliptical spiral phase and the spin-flop transition in multiferroic mn1-xcoxwo4. *Phys. Rev. B* 79.
- URCELAY-OLABARRIA, I., 2013. *Magnetic order, spin-induced ferroelectricity and structural studies in multiferroic Mn1-xCoxWO4*. Universidad Autónoma de Barcelona tesia.
- , J. L. GARCÍA-MUÑOZ, E. RESSOUCHE, V. SKUMRYEV, V. Y. IVANOV, A. A. MUKHIN, eta A. M. BALBASHOV. 2012a. Lattice anomalies at the ferroelectric and magnetic transitions in cycloidal mn0.95co0.05wo4 and conical mn0.80co0.20wo4 multiferroics. *Phys. Rev. B* 86.
- , J.M. PEREZ-MATO, J. L. RIBEIRO, J. L. GARCÍA-MUÑOZ, E. RESSOUCHE, V. SKUMRYEV, eta A. A. MUKHIN. 2013. Incommensurate magnetic structures of multiferroic mnwo4 studied within the superspace formalism. *Phys. Rev. B* 87.
- , E. RESSOUCHE, A. A. MUKHIN, V. Y. IVANOV, A. M. BALBASHOV, J. L. GARCÍA-MUÑOZ, eta V. SKUMRYEV. 2012b. Conical antiferromagnetic order in the ferroelectric phase of mn0.8co0.2wo4 resulting from the competition between collinear and cycloidal structures. *Phys. Rev. B* 85.
- , E. RESSOUCHE, A. A. MUKHIN, V. Y. IVANOV, A. M. BALBASHOV, G. P. VOROBEV, Y. F. POPOV, A. M. KADOMTSEVA, J. L. GARCÍA-MUÑOZ, eta V. SKUMRYEV. 2012c. Neutron diffraction, magnetic, and magnetoelectric studies of phase transitions in multiferroic mn0.90 co0.10 wo4. *Phys. Rev. B* 85.
- YE, F., R. S. FISHMAN, J. A. FERNANDEZ-BACA, A. A. PODLESNYAK, G. EHLERS, H. A. MOOK, Y. WANG, B. LORENZ, eta C. W. CHU. 2011. Long-range magnetic interactions in the multiferroic antiferromagnet mnwo4. *Phys. Rev. B* 84.
- , Y. REN, J. A. FERNANDEZ-BACA, H. A. MOOK, J. W. LYNN, R. P. CHAUDHURY, Y.-Q. WANG, B. LORENZ, eta C. W. CHU. 2008. Magnetic switching and phase competition in the multiferroic antiferromagnet mn1-xfexwo4. *Phys. Rev. B* 78.