

Tanulmányok

CSAVAR A MÁGNESES ANYAGOK KUTATÁSÁBAN: CSAVARODÓ MÁGNESES SZERKEZETEK ÉS MÁGNESES SKYRMIONOK

A TWIST IN THE RESEARCH OF MAGNETIC MATERIALS: SPIN SPIRALS AND MAGNETIC SKYRMIONS

Bordács Sándor

a fizikai tudomány doktora

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest
HUN-REN–BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport, Budapest
bordacs.sandor@ttk.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Királis vagy ferroelektromos anyagokban a kristályrács sérült tükrözési szimmetriájának következtében az atomi mágneses momentumok kizárólag jobbra vagy balra csavarodó mintázatban, spinspirál állapotban rendeződhetnek. Az elmúlt évtizedben a mágnesség kutatásában komoly figyelmet kapott az ezen anyagokban megjelenő ún. mágneses skyrmionok tanulmányozása, amelyek örvénylő vagy sündisznószerű, nanométeres skálájú mágnesezettségmintázatok. A nemtriviális topológiájú mágneses skyrmionok érdekes tulajdonságainak megismerése mellett elkezdődött számítástechnikai alkalmazási potenciáljuk felderítése is.

ABSTRACT

Atomic magnetic moments form either left or right twisting spirals in chiral or polar magnets due to the broken mirror symmetries of the crystal lattice. In the last decade, the so-called magnetic skyrmions emerging in these materials have received considerable attention in magnetization research. In addition to learning about the interesting properties of these whirling or hedgehog-like nanoscale magnetization patterns with non-trivial topology, current research also started to explore their potential in data storage and computing devices.

Kulcsszavak: mágneses skyrmion, spinspirál, királis mágnes, multiferroikus anyag

Keywords: magnetic skyrmion, spin spiral, chiral magnet, multiferroics

A nem fizikus olvasó általában az anyagok kétféle mágneses fázisával találkozik: a paramágnesekkel, amelyekben az atomi mágneses momentumok a hőmozgás miatt rendezetlenek, illetve a ferromágnesekkel, amelyekben a momentumokat a közöttük ható kölcsönhatások azonos irányba rendezik, így makroszkopikus mágnesezettséget mutatnak.¹ Ezen rendszerek fő építőelemei az atomok mágneses momentumaiért felelős külső elektronok párosítatlan spinjei, illetve kompenzálatlan pályamomentumai. A mágnesség kutatásának fő kérdései, hogy 1) az atomok spinjei között milyen kölcsönhatások jelenhetnek meg, 2) azok a spineket rendezik-e, illetve 3) ha igen, milyen mintázatba. Ennek a kérdéskörnek a vizsgálata számos érdekes és igen általános eredményre vezetett. Például éppen a hőmérséklet csökkentésével bekövetkező paramágneses-ferromágneses fázisátalakulás inspirálta a statisztikus fizika egyik legtöbbet tanulmányozott rendszerének, az Ising-modellnek a kidolgozását, amely kiterjesztéseivel együtt alkalmasnak bizonyult a természetben előforduló számos fázisátalakulás és mintázatképződési folyamat tanulmányozására.

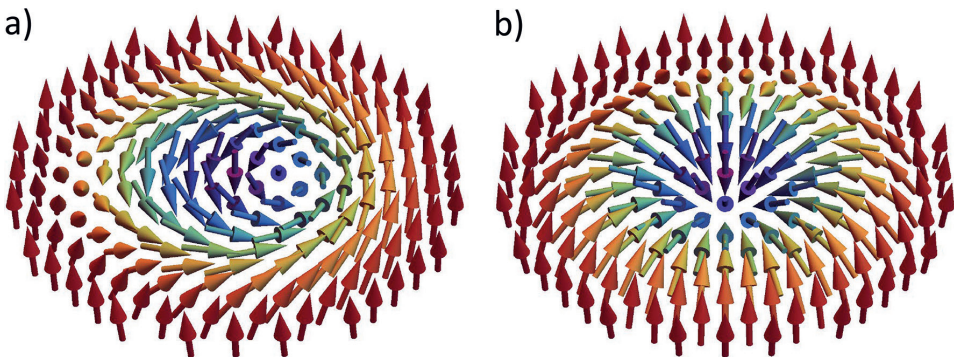
Szemben az Ising-moddal, ahol az atomi mágneses momentumok csak két irányba mutathatnak (fel és le), egy (közel) izotróp rendszerben a spineket klasszikusan egy, a három dimenzióban tetszőleges irányba mutató nyíllal ábrázolhatjuk. (A klasszikus közelítést meghaladva a valójában kvantumos spinek ábrázolása ennél gazdagabb.) Valódi anyagokban nemcsak a legközelebbi szomszédok kölcsönhatása érvényesülhet, hanem több, egymással versengő kölcsönhatás is jelen lehet, ami összetett mágnes mintázatok megjelenését eredményezheti. Általában a legerősebb az ún. Heisenberg-féle kicserélődési kölcsönhatás, amelyhez tartozó energiatag a kölcsönható spinek skalárszorzatával arányos ($S_1 \cdot S_2$), így azok egymással párhuzamos vagy antiparallel, kollineáris rendeződését preferálja. Azonban, ha a távolabbi szomszédokkal történő kölcsönhatás ellentétes irányú rendnek kedvezne, kompromisszumos megoldásként, a spinek térben csavarodó mintázatot, spinspirált alakíthatnak ki. Egy másik lehetőség, ha a kölcsönható spinek között nincs középpontos tükrözési szimmetria, hogy megjelenhet a relativisztikus eredetű, a spinek ($S_1 \times S_2$) keresztszorzatával arányos ún. Dzjalosinszkij–Moriya (Dzjaloshinskii–Moriya) kölcsönhatás is. Mivel az utóbbi általában gyenge, ezért a Heisenberg- és a Dzjalosinszkij–Moriya-kölcsönhatások versengése miatt megjelenő spinspirál mintázat periódusa lényegesen nagyobb, mint az atomok közötti távolság. Ebben az esetben a diszkrét atomi rácspontokon értelmezett spinek helyett bevezethető azok folytonos mezője.

Olekszij (Alexei) Bogdanov és munkatársai az 1980-as évek végén publikált úttörő munkáikban arra keresték a választ, hogy a mágnesezettségmezőben milyen,

¹ A teljesség kedvéért megjegyezzük, hogy léteznek diamágneses anyagok is, amelyeknek csak külső mágneses térben van véges, nemzérus mágneses momentuma. Ez a térrel ellentétes, tehát a mágneses mező taszítja azokat.

a homogén ferromágneses fázistól eltérő mintázatok jelenhetnek meg (Bogdanov–Yablonskii, 1989a, 1989b; Bogdanov–Hubert, 1994a, 1994b). Megjósolták, hogy azokban a mágneses anyagokban, amelyek kristályrácsa sérti a középpontos tükrözési szimmetriát, a spirális mintázat mellett megjelenhetnek háromszögácsba rendeződött spinörvények is. Még az 1960-as években, Tony Skyrme angol fizikus kidolgozott egy elméletet, amely az elemi részecskék stabilitását egy magasabb dimenziós mező „örvényeivel”, nemtriviális topológiájú hibáival magyarázta (Skyrme, 1962). Az ezekkel analóg spinörvényeket később mágneses *skyrmion*oknak nevezték el. Bogdanov és munkatársai mágnesezettségmezőkkel kapcsolatos elméleti munkái előre jelezték azt is, hogy egyedi skyrmionok jelenhetnek meg a ferromágneses fázisban, amelyek szabad részecskékhez hasonlítanak. Ezeknek a részecskeszerű állapotoknak a (meta)stabilitását a skyrmion nemtriviális örvénylése, topológiája adja, azaz a spinmező folytonos deformációjával a skyrmiont nem lehet eltüntetni. Ez a topologikus stabilitás.

A mágneses skyrmionok első megfigyelésére harminc évet kellett várni. Christian Pfleiderer és csoportja 2009-ben publikált munkájukban egy tükrözési szimmetria nélküli rácsban kristályosodó, azaz királis mágneset, a MnSi-kristályt vizsgálta. Kétszögű neutronszórás (Small Angle Neutron Scattering, SANS) kísérleteikben a mágneses momentummal bíró neutronok elhajlását figyelték meg, és a mágneses térre merőleges síkban megjelenő, hatfokúsú szimmetriát mutató szórési képet skyrmionok 20 nm-es rácsállandójú háromszögácsával tudták értelmezni (Mühlbauer et al., 2009). A következő évben, Tokura Josinori (Yoshinori Tokura) laboratóriumában, transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM) segítségével sikerült a skyrmionokat közvetlenül, valós térben is detektálni (Yu et al., 2010). Kísérletükben a spinmintázat által keltett mágneses mező a Lorentz-erőn keresztül elhajlította az elektronnaláb pályáját, amit képalkotásra használtak fel.



1. ábra. A mágneses skyrmionok két fajtája:
Bloch- és Néel-típusú skyrmionok örvénylő és sündisznószerű spinmintázattal
(Balla Péter munkája)

A skyrmionok első kimutatását követően a terület gyors fejlődésnek indult. A fent említett Lorentz-TEM segítségével sikerült a ferromágneses fázison belül egyedi skyrmionokat is megfigyelni. Ezen kísérletek megmutatták, hogy a (meta)stabil skyrmionok egyedi részecskékhez hasonlóan viselkedhetnek, és nemcsak kristályrácsba rendeződve jelenhetnek meg. Mágneses térben végzett transzportkísérletek szerint a skyrmionrácsra keresztül hajtott áram iránya eltérül, ennek következtében az eredeti áramra merőleges feszültség mérhető. Ez a jelenség az ún. topologikus Hall-effektus. Elméleti számítások szerint a vezetési elektronok spinjükön keresztül kölcsönhatnak a mágneses skyrmionokkal, és azok elforgatják a vezetési elektron spinjét, illetve megváltoztatják a pályájukat. A topologikus Hall-effektus alkalmasnak bizonyult a skyrmionok számának meghatározására is, mivel a skyrmionok száma arányos a Hall-feszültséggel. Későbbi kísérletek egy küszöbérték feletti áramsűrűség esetén a Hall-jel csökkenését detektálták. A jelenség értelmezéséhez a töltéssűrűség-hullámokhoz hasonlóan feltételezték, hogy kis áramsűrűségek mellett a skyrmionok pozíciója a kristályhibákhoz rögzített, viszont a kritikus érték felett a vezetési elektronok visszahatására a skyrmionok elkezdnek sodródni. Ezt a hipotézist a skyrmionok áram hajtotta mozgásának Lorentz-TEM-mel történő megfigyelésével sikerült közvetlenül is igazolni.

A mágneses skyrmionok – nanométeres kiterjedésük és a vezetési elektronokkal történő erős kölcsönhatásuk miatt, valamint annak okán, hogy mágneses vékonyrétegekben is sikerült stabilizálni azokat – felkeltették a mágneses adattárolással foglalkozó szakemberek figyelmét. A Stuart Parkin által az IBM-nél vezetett kutatócsoport az ún. mágneses versenypálya-memória koncepcióját javasolta új típusú, nagy adatsűrűségű, nem illékony memóriának (Parkin et al., 2008). A koncepció lényege, hogy mágneses nanoszalagokat a síkból kiemelve hajtogatnának fel, ami egységnyi felületen nagyobb adattárolási kapacitást engedne meg. Ahhoz, hogy a versenypálya-memória mechanikai hatásokkal szemben ellenállóbb legyen, a merevlemezekből ismert mozgó alkatrészeket elhagynák, és az adattárolásban részt vevő mágneses doménfalakat áramimpulzusokkal mozgatnák az író/olvasófej alatt. A Nobel-díjas Albert Fert és csoportja szimulációk segítségével demonstrálta, hogy a skyrmionok sokkal kisebb áramsűrűségekkel mozgathatók, mint a doménfalak, ezért alkalmazásuk előnyös lehet ilyen adattárolókban (Fert et al., 2013). Az elmúlt években számos új elképzelés is megjelent, amelyek a fenti jelenségek kiaknázásával a skyrmionok logikai egységekben vagy neurális hálózatokban történő alkalmazására tettek javaslatot. Ezen lehetőségek, valamint a topologikus spinstruktúrák új típusainak elméleti és kísérleti vizsgálata jelenleg is nagyon aktív kutatási terület, amit az is példáz, hogy a témához kapcsolódóan hetente kb. tíz cikk jelenik meg az arXiv-preprintszerveren.

A terület fejlődéséhez kollégáimmal az ún. Néel-típusú skyrmionok tömbi anyagokban történő megfigyelésével járultunk hozzá (Kézsmárki et al., 2015;

Bordács et al., 2017; Butykai et al., 2017; Geirhos et al., 2020; Butykai et al., 2022). Bár a korai térelméleti munkák is jelezték már, hogy mágneses skyrmionok nemcsak királis mágnesekben jelenhetnek meg, hanem más, térbeli tükrözési (inverziós) szimmetriát sértő anyagokban is, 2015-ig csak az *1. ábra* bal oldalán látható, örvénylő mintázatot mutató, ún. Bloch-típusú skyrmion volt ismert kristályos anyagokban. Szimmetriamegfontolásokból tudható, hogy a kiralitás mellett az elektromos polarizáció is lehetővé teheti a skyrmionok megjelenését. Kézsmárki Istvánnal, valamint nemzetközi kutatótársakkal közösen publikált munkánkban egy olyan multiferroikus anyagot – egyszerre ferroelektromos és mágneses rendeződést is mutató vegyületet – vizsgáltunk, amely gyenge mágneses térben több mágneses fázisátalakulást mutat (Kézsmárki et al., 2015). SANS-kísérleteket végezve megmutattuk, hogy kb. 18 nm periodicitású térben modulált mágneses állapotok váltják egymást, ha a hőmérsékletet vagy a mágneses teret változtatjuk. A mágnesezettség térbeli változására érzékeny atomerő-mikroszkóp (AFM), mágneseserő-mikroszkóp (MFM) segítségével valós térben is sikerült a spinspirál és a mágneses skyrmionrács állapotokat detektálnunk, így megmutattuk, hogy a tömbi multiferroikus anyagokban az *1. ábra* jobb oldalán látható sündisznószerű, Néel-típusú skyrmion stabil. További kísérleteinkben megfigyeltük, hogy a ferroelektromos és a mágneses rend nem független egymástól. A ferroelektromosság miatt a minták hajlamosak réteges szerkezetű strukturális doménekre darabolódni, amelyek határain a tömbi állapottól eltérő mágneses szerkezetek jelennek meg. Továbbá megfigyeltük, hogy a mágnesség és a polarizáció ingadozásai is erősen csatolódnak, azaz a spinek kitérései megrezgetik a kristályrácsot is, ami elektromos és mágneses terekkel vezérelhető mikrohullámú elnyeléshez vezet.

A fentebb említett témák mellett a mágneses skyrmionok kutatását választó (fiatal) kutatókat számos izgalmas kérdés várja. Például, létezhetnek ún. antiskyrmionok is. Ha egy skyrmion kerületén körbeme gyünk, a spin a körüljárással azonos irányban csavarodik, míg antiskyrmionokban azzal ellentétesen. Az elmúlt néhány év kutatásai megmutatták, hogy ezt a spinszerkezetet is lehetséges stabilizálni, azonban ennek tulajdonságai ma még kevésbé ismertek. Egy másik aktívan vizsgált kérdéskör a csavarodó mintázatok és skyrmionok megjelenésének felderítése antiferromágnesekben, ahol a szomszédos spinek egymással ellentétes irányban állnak. Elméleti számítások szerint itt a skyrmionok gyorsabban és egyenes vonal mentén haladhatnak, azonban kísérleti megfigyelésük jelenleg csak antiferromágnesesen csatolt vékonyrétegekre korlátozódik. Más elméleti munkák azt jósolják, hogy ha különböző Heisenberg-kölcsönhatások egymással versengve stabilizálnak mágneses skyrmionokat, akkor azok mind Bloch-, mind pedig Néel-típusúak lehetnek. Ezen munkák felvetik, hogy elektromos és mágneses mező segítségével skyrmionokat lehet írni és törölni, illetve a különböző típusokat egymásba alakí-

tani. A skyrmionok kutatásába bekapcsolódóknak, illetve a fizikai részletek iránt érdeklődőknek ajánlom Rózsa Levente és Palotás Krisztián kiváló írását (Rózsa–Palotás, 2023).

*

Köszönöm Balla Péter segítségét az ábrák elkészítésében, valamint segítő megjegyzéseit. Továbbá köszönöm Asbóth Jánosnak a szöveg részletes átolvasását. A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2022-2.1.1-NL-2022-00004 számú projekt finanszírozásában valósult meg.

IRODALOM

- Bogdanov, Alexei N. – Hubert, Alex (1994a): Thermodynamically Stable Magnetic Vortex States in Magnetic Crystals. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 138, 3, 255–269. DOI: 10.1016/0304-8853(94)90046-9
- Bogdanov, Alexei N. – Hubert, Alex (1994b): The Properties of Isolated Magnetic Vortices. *physica status solidi b*, 186, 527–543. DOI: 10.1002/pssb.2221860223, https://www.researchgate.net/publication/264733119_The_Properties_of_Isolated_Magnetic_Vortices
- Bogdanov, Alexei N. – Yablonskii, Dmitriy A. (1989a): Thermodynamically Stable “Vortices” in Magnetically Ordered Crystals. The Mixed State of Magnets. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 95, 178–182. <https://tinyurl.com/59jcr2hm>
- Bogdanov, Alexei N. – Yablonskii, Dmitriy A. (1989b): Contribution to the Theory of Inhomogeneous States of Magnets in the Region of Magnetic-Field-Induced Phase Transitions. Mixed State of Antiferromagnets. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 96, 253–260.
- Bordács Sándor – Butykai Ádám – Szigeti Bertalan G. et al. (2017): Equilibrium Skyrmion Lattice Ground State in a Polar Easy-Plane Magnet. *Scientific Reports*, 7, 7584. DOI: 10.1038/s41598-017-07996-x, <https://real.mtak.hu/64538/>
- Butykai Ádám – Bordács Sándor – Kézsmárki István et al. (2017): Characteristics of Ferroelectric-Ferroelastic Domains in Néel-Type Skyrmion Host GaV4S8. *Scientific Reports*, 7, 44663. DOI: 10.1038/srep44663, <https://www.nature.com/articles/srep44663#citeas>
- Butykai Ádám – Geirhos, Korbinian – Szaller Dávid et al. (2022): Squeezing the Periodicity of Néel-Type Magnetic Modulations by Enhanced Dzyaloshinskii-Moriya Interaction of 4d electrons. *npj Quantum Materials*, 7, 26. DOI: 10.1038/s41535-022-00432-y, <https://www.nature.com/articles/s41535-022-00432-y#citeas>
- Fert, Albert – Cros, Vincent – Sampaio, João (2013): Skyrmions on the Track. *Nature Nanotechnology*, 8, 3, 152–156. DOI: 10.1038/nnano.2013.29, https://www.researchgate.net/publication/235786834_Skyrmions_on_the_track
- Geirhos, Korbinian – Gross, Boris – Szigeti Bertalan et al. (2020): Macroscopic Manifestation of Domain-Wall Magnetism and Magnetoelectric Effect in a Néel-Type Skyrmion Host. *npj Quantum Materials*, 5, 44. DOI: 10.1038/s41535-020-0247-z, <https://www.nature.com/articles/s41535-020-0247-z#citeas>

- Kézmárki István – Bordács Sándor – Milde, Peter et al. (2015): Néel-Type Skyrmion Lattice with Confined Orientation in the Polar Magnetic Semiconductor GaV4S8. *Nature Materials*, 14, 1116–1122. DOI: 10.1038/nmat4402, <https://real.mtak.hu/29223/>
- Mühlbauer, Sebastian – Binz, Benedikt – Jonietz, Florian et al. (2009): Skyrmion Lattice in a Chiral Magnet. *Science*, 323, 5916, 915–919. DOI: 10.1126/science.1166767, <https://arxiv.org/pdf/0902.1968.pdf>
- Parkin, Stuart S. P. – Hayashi, Masamitsu – Thomas, Luc (2008): Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory. *Science*, 320, 5873, 190–194. DOI: 10.1126/science.1145799
- Rózsa Levente – Palotás Krisztián (2023): Nanoméretű mágneses szerkezetek topológiája. *Fizikai Szemle*, 4, 114–120. <http://goliat.eik.bme.hu/~f.simon/publications/Media/FizSzem-202304.pdf>
- Skyrme, Tony H[ilton] R[oyle] (1962): A Unified Field Theory of Mesons and Baryons. *Nuclear Physics*, 31, 556–569. DOI: 10.1016/0029-5582(62)90775-7
- Yu, Xujie Z. – Onose, Yoshinori – Kanazawa, Naoya et al. (2010): Real-Space Observation of a Two-Dimensional Skyrmion Crystal. *Nature*, 465, 901–904. DOI: 10.1038/nature09124