

# NANOMÁGNESSÉG

Szunyogh László

az MTA doktora, egyetemi tanár,  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Elméleti Fizika Tanszék  
szunyogh@phy.bme.hu

## Bevezetés

A tudomány iránt érdeklődő olvasók minden bizonnyal sokat tudnak a *nanotudomány* és *nanotechnológia* csodálatos eredményeiről. A biotechnika, az elektronika, a számítástechnika és az anyagtudomány számos új vívmánya atomi méretű vagy annál nem sokkal nagyobb szerkezetekkel kapcsolatos. Viszonylag tág értelmezéssel, a nanotudomány olyan objektumok vizsgálatával foglalkozik, amelyek kiterjedése legalább egy irányban (dimenzióban) a néhány tized nanométer ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) és az egy mikrométer ( $1 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm}$ ) közötti mérettartományba esik. Figyelembe véve, hogy az átlagos atomi méret  $0,2\text{--}0,3 \text{ nm}$ , ez a definíció magában foglalja egy hordozóanyag belsejében vagy felületén abszorbeált individuális atomokat, valamint a több száz nm kiterjedésű, több tízmillió atomot tartalmazó nanokristályokat is. Napjaink tudományos-technológiai forradalmában játszott szerepe mellett a nanotudománynak az ad különleges jelentőséget, hogy ezen a méretskálán újszerű és meglepő jelenségek tapasztalhatók, amelyek megértése csupán a kvantummechanika törvényszerűségei alapján lehetséges. A nanotudományon belül a *nanomágnesség* önmagában is tág tudományterület. A cikk rövid betekintést

nyújt a nanomágnesség témakörébe és eredményeibe. Természetesen nem próbálhatjuk meg a teljes témát felölelni, és az is valószínű, hogy ez az összefoglaló inkább egy elméleti kutató szemléletéhez áll közel.<sup>1</sup>

Számos baktériumban, puhatestűben, rovarban és egyéb állatban találhatóak mintegy  $40\text{--}100 \text{ nm}$  méretű magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) *nanorészecskék*, amelyek mágneses szenzorként a Föld mágneses terét érzékelik. Hasonló részecskék vannak bizonyos kőzetekben és ásványokban (például mágnesevaskő). Ezek segítségével archeomágneses kormeghatározás végezhető, vagy a Föld mágneses terének hosszú időskálán történő változását lehet nyomon követni. A nanomágnesség túlnyomórészt *mesterségesen előállított nanoanyagokkal* foglalkozik. Ilyenek például a mágneses *nanokompozitok*, amelyek fémüvegekből állíthatók elő részleges átkristályosítással. Szerkezetükre jellemző, hogy  $1\text{--}50 \text{ nm}$  átmérőjű Fe-, illetve Fe-Si- nanorészecskék vannak beágyazva egy amorf hordozóanyagba. A részecskék méretétől és összetételétől függően ezek a nanokompozitok lehetnek állandó mágnesek, lágy mágnesek vagy magnetorezisztív anyagok (lásd később). Az utóbbi évtizedek-

---

<sup>1</sup> A végleges kézirat 2013. júniusi beküldése után született új irodalmi eredmények néhány vonatkozásban tükrözik a tanulmányban szereplő megállapításokon.

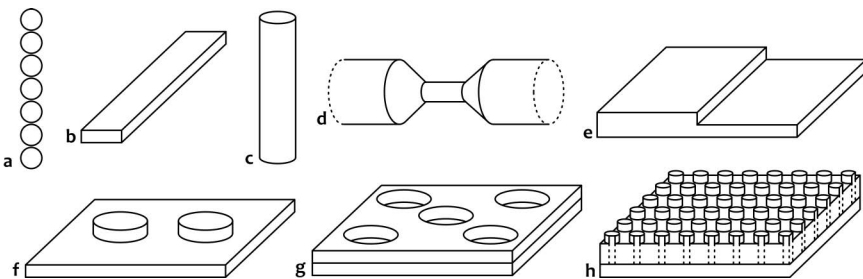
ben számos módszerrel, amelyek leírására itt nem tudunk kitérni, a legkülönbözőbb méretű és alakú nanoszerkezeteket állították elő. A *Ralph Skomski* összefoglalójából kölcsönvett *I. ábrán* (Skomski, 2003) a mesterségesen létrehozott nanoszerkezetek gyakori geometriai típusait mutatjuk be. Az új nanostruktúrák gyártásának motorja a funkcionálisan tökéletesebben működő, sok esetben teljesen új minőségű eszközök fejlesztése. A *mágneses felületek, vékonyrétegek és multirétegek* (rétegsorok) jól elkülönülő kutatási területet jelentenek a nanomágnességen belül. Ezek a rendszerek csak egy dimenzióban véges méretűek, és a felülettel párhuzamosan végtelennek tekinthetők, ezért sok jelenség itt érthető meg, illetve tanulmányozható legjobban.

#### *Mágneses kölcsönhatások és spinmodellek*

Az Einstein–de Haas-kísérletből tudjuk, hogy a ferromágneses anyagok mágneses momentuma nem az elektronok pályaperdületétől, hanem az ún. *spintől* származik. A spin fogalmát a relativisztikus kvantummechanika tisztázta: a spin is perdület jellegű mennyiség, de a pályaperdülettől eltérően nem a részecske sebességével kapcsolatos. Az elektron spinje feles, ami azt jelenti, hogy tetszőleges irányra nézve két spinállapota ( $\pm 1/2$  vagy  $\uparrow/\downarrow$ )

lehetséges. Egy atomban lévő elektronok spinjei a kvantummechanika szabályai szerint összeadódva meghatározzák az atom spinjét (S) és spin mágneses momentumát:  $M = g\mu_B S$ , ahol  $g \approx 2$  az ún. giromágneses állandó,  $\mu_B$  pedig az elemi mágneses momentum (Bohr-magneton). Bár egy fém vegyértékelektronjai nagy tértartományra (szabályos rácsnál az egész rácsra) kiterjednek, többnyire megfelelő az a leírás, hogy az atomoknak lokális spin mágneses momentumai vannak, amelyek iránya tetszőleges lehet (klasszikus spinvektorok).

Ha az atomi momentumok nagysága és iránya (a mérés időátlagában) megegyezik, akkor ferromágneses (FM) rendről, ha a momentumok alternálva két ellentétes irányba mutatnak, akkor antiferromágneses (AFM) rendről beszélünk. Ezeken felül természetesen még sok egyéb mágneses rendeződésű anyag létezik, például a ferrimágnesek és a mágneses csavarszerkezetek. A ferromágnesekben nagyobb méretű egyező irányított-ságú tartományok, ún. mágneses domének találhatóak. Egy makroszkopikus minta mágneses momentumának átfordulása (átmágneseződés) az individuális domének átbillenése és a doménfalak mozgása révén megvalósuló komplex folyamat. Ennek következménye például a Barkhausen-zaj.



*I. ábra* • Tipikus nanoszerkezet-geometriák: a – nanorészecske-lánc; b – nanoszalag; c – hengeres nanocső; d – nanokontaktus; e – lépcső felületen; f – nanopöttyök; g – nanolyukak; h – nanoszemcse-rács. (Forrás: Skomski, 2003)

Már a 20. század első harmadának végére nyilvánvalóvá vált, hogy a kollektív mágnesség eredete a kvantummechanikai eredetű *kicszerélődési kölcsönhatás*. Az izotrop kicszerélődési kölcsönhatás a két spin-momentum irányvektorainak skalárszorzatával arányos,  $-J_{12}\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2$ , ahol  $J_{12}>0$  esetén a csatolás ferromágneses,  $J_{12}<0$  esetén antiferromágneses. Alapvető jelentőségű a mágneses momentumok közötti hosszú távú *dipól–dipól kölcsönhatás*, ami a doménszerkezet kialakulásáért felelős, illetve véges méretű mágneselektronokban a minta alakjától függő anizotropia energia forrása. Ferromágneses vékonyrétegekben a mágneses dipól–dipól kölcsönhatás a mágnesezettség síkkal párhuzamos irányát preferálja, és az energia arányos a rétegvastagsággal. Az anizotropia másik forrása a relativisztikus eredetű spin–pálya kölcsönhatás. Szemléletesen úgy fogalmazhatunk, hogy az elektromosan töltött, mozgó elektron által keltett mágneses tér kölcsönhat a spintől származó mágneses momentummal. A *magnetokristályos anizotropia* tömbi mágneselektronokban is jelen van, de a vékonyrétegek és nanorészecskék (határ)felületein meghatározó járulékot adhat a rendszer energiájához. Leggyakrabban az egytengelyű anizotropia  $K_a(S_z)^2$  modelljét használjuk, ahol  $K_a<0$  ( $>0$ ) a spinek felületre merőleges (a felülettel párhuzamos) beállását preferálja. A  $\mathbf{H}$  külső mágneses tér hatását a  $-\mathbf{H}\cdot\mathbf{M}$  Zeeman-energia írja le.

A szokásos spinmodellek a fenti kölcsönhatásokat tartalmazzák. A paramétereiket (atomi mágneses momentumok, kicszerélődési kölcsönhatás együtthatói, anizotropia-állandó) a kísérleti adatokból vagy kvantummechanikai számításokból lehet megkapni. A rendszer mágneses szerkezete és mágneses dinamikája a statisztikus fizika eszközeivel (átlagtér-elmélet, Monte Carlo-szimulációk

vagy a spinrendszer időfejlődését leíró Landau–Lifshitz–Gilbert-egyenlet) modellezhető. A spinmodellek segítségével a mágneses jelenségek széles skálája írható le. Példaként említjük a doménstruktúrák kialakulását és mozgását, termálisan aktivált átmágneseződési folyamatokat legkülönbözőbb geometriájú mintákban, a vékonyrétegek vastagság- és hőmérsékletfüggő spinátfordulását vagy az FM–AFM-határfelület jelenlétében létrejövő kicszerélődési eltolódás (*exchange bias*) jelenségét (Nowak, 2007). Nem csoda, hogy az atomi spindinamika és mikromágneses szimuláció a nanomágnesesség kutatásának rendkívül elterjedt, a technológiai fejlesztéseket közvetlenül szolgáló elméleti eszköze lett.

#### *Szuperparamágnesesség és mágneses adattárolás*

A ferromágnesek egyik legjellegzetesebb tulajdonsága, hogy a Curie-hőmérséklet alatt a mágnesezettség hiszterézist mutat a külső mágneses tér függvényében. Az  $M(H)$  hiszterézisgörbe három alaplajosa az  $M_S=M(H\rightarrow\infty)$  szaturációs mágnesezettség, az  $M_R=M(H=0)$  remanens mágnesezettség és a  $H_C$  koercitív tér, amelyre  $M(H_C)=0$ . A kemény mágneselektronokat nagy, a lágy mágneselektronokat kis koercitív tér jellemzi. Megjegyezzük, hogy paramágneses esetében  $H_C=0$ , és a szaturációs mágnesezettség általában jóval kisebb, mint a ferromágneses anyagoké.

A ferromágneses részecskék  $D$  átmérőjének csökkenésével a koercitív tér jellegzetes változást mutat: először növekszik, tipikusan  $D_S=50\text{--}100$  nm-nél maximumot ér el, majd meredeken csökken, és  $D_p=10\text{--}15$  nm alatt eltűnik, azaz a rendszer paramágneses jellegű lesz.  $D>D_S$  esetén a nanorészecske több domént tartalmaz (multidomén szerkezet),  $D<D_S$  esetén a nanorészecske uniform mág-

nesezettségű (egy-domén állapot). Egy ilyen nanorészecskére két, ellentétes mágneses momentumú (meta)stabil állapot jellemző. A két állapot közötti átmenethez  $K_a V$  nagyságú energiabarriert kell legyőzni, ahol  $K_a$  az uniaxiális anizotrópia konstans és  $V$  a részecske térfogata. A termálisan aktivált átmenet időállandóját, a Néel-féle relaxációs időt, a Néel–Arrhenius-törvény alapján lehet meghatározni:  $\tau = \tau_0 \exp(K_a V / k_B T)$ , ahol  $\tau_0$  anyagi állandó,  $k_B$  a Boltzmann-állandó és  $T$  a hőmérséklet. Ha a részecske elegendően kicsiny, azaz  $D < D_p$ , akkor külső tér nélkül is sok átbillenés következik be a két stabil állapot között a mérés  $\tau_m$  átlagos időtartama alatt, tehát az átlagos (mért) mágneses momentum zérus. Ezt nevezzük *superparamágneses állapotnak*. A szokásos paramágneses viselkedéstől az különbözteti meg, hogy a saturációs mágnesszettség, ill. a mágneses szuszceptibilitás a ferromágnesekéhez hasonló nagyságú. A superparamágnesek jellemző mennyisége a  $T_B$  blokkolási hőmérséklet, amely fölött a koercitív tér eltűnik. Ennek meghatározó egyenlete:  $T_B = K_a V / k_B \ln(\tau_m / \tau_0) \approx 20-25 K_a V / k_B$ . Superparamágneses vas-oxid nanorészecskéket ígéretesen használnak *orvosbiológiai és gyógyászati alkalmazásokban*, például MRI-kontrasztanyagként, sejtek, fehérje- és DNS-molekulák szétválasztására, hatóanyag-molekulák célzott eljuttatására a szervezetbe és daganatos sejtek hipertermiás elpusztítására.

Az ultranagy sűrűségű mágneses adattárolás a mágneses bit méretének csökkentésével érhető el. Ennek azonban határt szab a superparamágneses viselkedés, hiszen a blokkolási hőmérséklet fölött a beírt információ elvész. A magas blokkolási hőmérséklet és kis részecskeméret eléréséhez a mágneses anizotrópia növelésére van szükség. Ezenkívül a szórt mágneses dipóltér destabi-

lizáló hatását is minimalizálni kell, ami úgy érhető el, hogy a bitek mágnesszettségét a felületre merőlegesen állítjuk. Ezt nevezzük *merőleges mágneses adattárolásnak* (*perpendicular magnetic recording – PMR*), amely 2005-től fokozatosan kiszorította a korábbi hosszirányú mágneses adattárolást (*longitudinal magnetic recording – LMR*). A merőleges adattároláshoz tipikusan réteges FePt-nanorészecskéket alkalmaznak, mivel a FePt-ötvetetet a vas- és platinarétegekre merőleges, nagy anizotrópia-energia és nagy mágneses momentum jellemzi. Ez utóbbi szükséges ahhoz, hogy a bitek átbillentésekor minél kisebb külső teret kelljen alkalmazni. A közeljövőben várható az ún. HAMR- (heat-assisted magnetic recording) technológia elterjedése, ahol az információ írásához a bitet egy fókuszált lézernyalábbal felmelegítik. Az igen rövid időre paramágneses állapotba kerülő nanorészecskéket már kis mágneses térrel át lehet mágnesezni. A Seagate Technology cég 2012 márciusában 1 terabit/négyzet-hüvelyk (1 terabit =  $10^{12}$  bit) adattárolási sűrűséget ért el a HAMR-technológia alkalmazásával (Seagate, 2012).

#### *Spinfüggő transzport nanokontaktusokban*

A nanoméretű heterogén mágneses rendszerek elektromos vezetési jelenségeiben nagy jelentőséget kap az a tény, hogy a különböző spinű elektronok vezetési tulajdonságai különböznek, azaz a transzport spinfüggő. Ezt a tulajdonságot használja ki a töltéstranszport helyett a spintranszportot, illetve *spininformáció-átvitelt* kutató és alkalmazó tudomány, a *spintronika*, amely értelemszerűen sok átfedést mutat a nanomágnességgel.

A kereskedelembe kapható számítógép-merevlemezek olvasófejei manapság szinte kizárólag az *óriás mágneses ellenálláson* (giant

magnetoresistance – GMR) alapuló technológiát alkalmazzák. A jelenség felfedezéséért *Albert Fert* és *Peter Grünberg* 2007-ben fizikai Nobel-díjat kaptak. A GMR-jelenséget először alternáló ferromágneses-nemmágneses (FM–NM) rétegekből álló multirétegekben mutatták ki, de gyakorlati alkalmazására a *spinszelepnek* nevezett eszköz révén került sor. A spinszelep lelke egy rögzített mágneses orientációjú és egy, a külső mágneses tér által irányított, szabad ferromágneses réteg, amelyeket egy nemmágneses (*spacer*) réteg választ el. A két FM-réteg egyirányú vagy ellentétes mágneses orientációja esetén az eszköz elektromos ellenállása jelentősen megváltozik, többnyire az egyirányú esetben kisebb. Az olvasónak ajánlom *Bakonyi Imre* és munkatársai (2008), valamint *Cserti József* (2008) kiváló magyar nyelvű összefoglalóit a GMR részletesebb leírásáról és fizikai magyarázatáról. Itt csupán azt említjük meg, hogy a spacer rétegnek elegendően (néhány nm) vékonynak kell lennie ahhoz, hogy az elektronok spinje az áthaladás során ne forduljon át. A GMR tehát olyan tipikus méreteffektus, amelyekről a bevezetőben említést tettünk.

A merevlemez olvasófeje előtt elhaladó bit mágneses tere a szabad FM-réteg mágneses irányán keresztül változtatja a spinszelep ellenállását, ami az átfolyó áramerősséggel könnyen kimérhető. A GMR-alapú olvasófejek elterjedése annak köszönhető, hogy jóval érzékenyebbek, mint a korábbi induktív vagy az anizotrop mágneses ellenálláson alapuló fejek, így lényegesen nagyobb adattárolási sűrűség esetén alkalmazhatók. GMR-alapú eszközöket sok helyen használnak, ahol a mágneses tér érzékeny mérésére van szükség (mágneses szenzorok).

Fölvetődik a kérdés, hogy a spinszelepen átfolyó áram megváltoztathatja-e a két FM-

réteg relatív mágneses orientációját. Elméleti megfontolásokból következik, hogy egyfajta spinbeállású elektronok árama (spin-polarizált áram) egy FM-rétegen áthaladva a réteg mágnesszettségét átfordíthatja. Ezt nevezzük *spinyomaték-átvitelnek* (*spin-torque transfer*), ugyanis a jelenség az áramot képviselő elektronok és az atomok összspinjének megmaradásán alapul, miközben a kölcsönhatást a kvantummechanikai kicserélődés közvetíti. A spinszelep megfelelő beállításával (például a spacer réteg vastagságával) megvalósítható, hogy az átfolyó áram irányától függően a két FM-réteg egyirányú vagy ellentétes irányú mágneses beállása stabilizálódjon. A gyakorlatban a spacer rétegben fém helyett valamely szigetelőanyagot (például alumínium-oxidot, magnézium-oxidot) alkalmaznak. A szigetelőn keresztül történő alagutazás (a kvantummechanikai *alagúteffektus* révén megvalósuló transzport) esetén fellépő, GMR-rel analóg jelenséget *alagutazó mágneses ellenállásnak* (*tunneling magnetoresistance – TMR*) nevezzük. A mágneses alagútkontaktusok (*magnetic tunneling junction – MTJ*) nagyobb érzékenységgűek és kevésbé hőmérsékletfüggőek, mint a GMR-spinszelepek, ezért kitűnően alkalmazhatók nem felejtő, véletlen hozzáférésű memóriaként (*magnetic random access memory – MRAM*). Az Everspin Technologies cég 2012 végén egy 64 Mbit kapacitású, spinyomaték elven működő MRAM (ST-MRAM) memóriaegység piacra dobását jelentette be (Everspin, 2012). Az ST-MRAM az elektronikai eszközökben használt flash memóriák komoly vetélytársa lehet a jövőben.

*Spinspirálok és skyrmionok – egy érdekes kölcsönhatás következményei*

A 2000-es évektől a *spinpolarizált pásztázó alagútmikroszkóp* (*spin-polarized scanning*

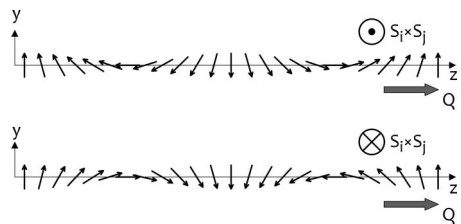


*tunneling microscope – SP-STM*) technika segítségével a felületi mágneses struktúrák atomi felbontású detektálása és karakterizálása vált lehetővé. Az STM a minta fölött néhány nm távolságban mozgatott tű és a minta közötti áramot detektálja az elektromos előfeszítés függvényében, így részletes információt szolgáltat a minta felületének elektronállapotairól térben és energiában lokális felbontásban. Ha a tű mágneses, az alagutazó elektronok spinje a tű mágneszettsége szerint polarizálódik, és az áramerősség a minta megfelelő polarizációjú elektronállapotainak sűrűségével lesz arányos. A tű mágneses irányának változtatásával kapott kontrasztképek analíziséből lehet következtetni a minta mágneses szerkezetére. A módszer nagy előnye, hogy igen nagy, lényegében atomi szintű felbontás érhető el (Wiesendanger, 2009). Jó példa erre, hogy a wolfram (110) Miller-indexű felületére felvitt ultravékony Fe-filmek SP-STM-vizsgálatából meghatározták a doménfalak vastagságát, és monorétegre  $\sim 1$  nm, míg két atomi rétegre  $\sim 4$  nm vastagságú falat kaptak. Ezeket a meglepően kis értékeket a spinmodellszámítások kielégítő pontossággal igazolták.

SP-STM-mérésekből és kvantummechanikai számításokból is ismeretes volt, hogy a W(110) felületre felvitt Mn monoréteg atomi soronként alternáló, a felülettel párhuzamos irányú antiferromágneses rendeződést mutat. A későbbi, atomi felbontású SP-STM-képekből viszont azt lehetett megállapítani, hogy ezt a rendeződést modulálja egy kb. 6 nm hullámhosszú periodikus spinstruktúra úgy, hogy a mágneses momentumok soronkénti egyirányú rendje megmarad. Az STM tű mágneses irányának változtatásával ki lehetett mutatni, hogy az atomi mágneses momentumok a sorok tengelye körül körfelfordulva kilépnek a felület síkjából (Bode et al., 2007).

Ez a szerkezet a ciklois *spinspirál*, amelyet a 2. ábra stilizál.

Az ilyen csavarszerkezet kialakulása a korábban tárgyalt kölcsönhatásokkal nem magyarázható, ezért a spinmodellt ki kell terjeszteni az ún. Dzsalsosinszkij (Dzjaloshinsky)-Moriya- (DM-) kölcsönhatással (Dzjaloshinsky, 1958; Moriya, 1960). Ez a kölcsönhatás arányos a két spinvektor keresztszorzatával,  $\mathbf{D}_{12} \cdot (\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2)$ , ahol  $\mathbf{D}_{12}$  az ún. DM-vektor. A DM-kölcsönhatás a spinek egymáshoz viszonyított elfordulását preferálja úgy, hogy  $\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2$  ellentétes irányú legyen  $\mathbf{D}_{12}$ -vel, hiszen így tud csökkenni a rendszer energiája. A DM-kölcsönhatás valójában a kicserélődési kölcsönhatás egy változata, ahol a spin-pálya kölcsönhatás szerepét is figyelembe vesszük. Érdekessége, hogy térbeli inverziószimmetriát mutató tömbi anyagokban eltűnik, de például komplex struktúrájú antiferromágnesek (például  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) „gyenge” ferromágnessége a DM-kölcsönhatással magyarázható. A spin-pálya kölcsönhatás indukálta anizotrópiához hasonlóan, sőt sok esetben annál nagyobb mértékben, a DM-kölcsönhatás szerepe a (határ)felület közelében megnő. Így van ez a Mn/W(110) monoréteg esetében is, ahol a felületi síkkal párhuzamos



2. ábra • Kétféle forgási irányú, jobbra haladó ciklois spinspirál. A felső ábrán az egymást követő spinvektorok keresztszorzata a lap síkjába, míg az alsó ábrán a síkból kifelé mutat. (Forrás: <http://www.hikari.uni-bonn.de/>)

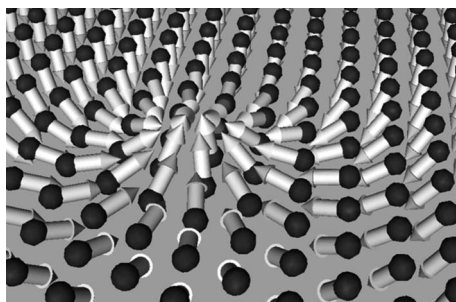
zamos DM-vektorok a mágneses momentumok síkból való kifordulását okozzák.

A 2. ábra azt illusztrálja, hogy egy ciklois spinspirálnak kétfajta forgási iránya lehetséges. Mivel a két esetben a szomszédos rácspontok spinvektorainak keresztszorzata ellentétes irányú, a DM kölcsönhatás csak az egyik esetben csökkenti a rendszer energiáját, a másik esetben éppenséggel növeli azt. Ebből következik, hogy a DM-kölcsönhatás a spinspirál egy meghatározott forgási irányát preferálja. SP-STM-mérésekkel valóban megfigyelték, hogy a  $\text{Fe}_2/\text{W}(110)$  ferromágneses film Néel típusú doménfalainak forgási iránya mindig ugyanaz, ami az előbb említett szimmetriasértés következménye. Ezt a gondolatot folytatva a BME Elméleti Fizika Tanszéken folyó elméleti vizsgálatok rámutattak, hogy az ultravékony mágneses filmek spinhullám-spektruma aszimmetrikus a haladás irányára nézve (Udvardi – Szunyogh, 2009).

Az utóbbi években a kutatások homlokterébe kerültek olyan nanoméretű, örvényszerű mágneses struktúrák, amelyek sok tekintetben hasonlatosak a nemlineáris térelmélet stabil részecskeszerű megoldásaihoz, amit Tony Skyrme magfizikus fedezett fel az 1960-as években. A *mágneses skyrmionok* (fonetikusán szkörmionok) folytonos deformációkkal szemben nagyfokú stabilitást mutatnak, szerkezetüknél fogva topologikusan védettek. A hőmérséklet és a mágneses tér megfelelő tartományában először tömbi mágnesekben (például  $\text{MnSi}$ ,  $\text{FeCoSi}$ ) mutattak ki skyrmion fázist, és azt elméletileg a DM-kölcsönhatás jelenlétével magyarázták. Kézenfekvő, hogy ultravékony rétegekben, ahol a DM-kölcsönhatás szerepe erőteljesebb, ugyancsak várható skyrmionok megjelenése. Ennek ellenére eddig csak  $\text{Fe}/\text{Ir}(111)$  monorétegen mutattak ki kísérletileg egy ún. nanoskyrmion-

rácsot (Heinze et al., 2011), amely jellegében azonban jelentősen különbözik a tömbi rendszerekben megfigyelt, individuális skyrmionokból álló rácstól. Dr. Simon Eszter (BME Elméleti Fizika Tanszék) szilárdtestfizikai elektronszerkezet-módszerekkel kiszámította a hafnium hexagonális szoros pakolású (hcp) rácának hatszöges szerkezetű, (0001) indexű felületére helyezett vas monoréteg spinmodell paramétereit, majd pedig spindinamika-szimulációkat végzett az alapállapot spinkonfiguráció meghatározására. Az alapállapot ferromágneses ugyan, de a szimulációk több esetben a 3. ábrán látható skyrmion állapotot eredményezték. Ennek a spinmintázatnak az energiája nem sokkal magasabb, mint a ferromágneses alapállapoté, így a vékonyréteg kísérleti kezelésétől függően nagy valószínűséggel előfordulhat. A  $\text{Fe}/\text{Hf}(0001)$  monoréteg skyrmionja kb.  $3 \times 3$  nm méretű, és szerkezetére jellemző, hogy a skyrmion középpontján bármely irányból áthaladva a spinek iránya  $2\pi$  szöget jár körbe.

A Nobel-díjas Albert Fert és munkatársai nemrég megjelent cikkükben tárgyalják a mágneses skyrmionok alkalmazási lehetőségeit (Fert et al., 2013). Kétségtelen, hogy a néhány nm átmérőjű és egymástól 10–20 nm távolságban elhelyezkedő felületi skyrmionok a jelenleg ismert maximális adattárolási sűrűséget legalább két nagyságrenddel növelhetnék. Fert és munkatársai számítógépes szimulációkkal vizsgálták a skyrmionok mozgását áram hatására egy nanoszalagban. Megállapították, hogy a skyrmionok a doménfalakhoz hasonló sebességgel mozgathatók, viszont ehhez jóval kisebb áram szükséges, mint a doménfalak esetében. Ezek alapján ők nagy reményt fűznek a mágneses skyrmionok alkalmazásához az ultrasűrűségű adattárolás és logikai eszközök technológiája terén.



3. *ábra* • Számítógépes szimulációval kapott skyrmion állapot Fe/Hf(0001) monorétegben. A gömbök a vasatomok, a nyilak a mágneses momentumok irányát mutatják. (Dr. Simon Eszter számolása, BME Elm. Fiz. Tsz., 2013)

A fenti példa is meggyőzően bizonyítja, hogy a nanomágnesség dinamikusan fejlődő, az alap- és alkalmazott kutatások fókuszában álló terület, amelytől a jövőben is várhatunk

a tudományt és társadalmat egyaránt gazdagító felfedezéseket.

Köszönetemet fejezem ki kollégáimnak, Dr. Udvardi Lászlónak, Dr. Újfalussy Baláznak és Dr. Palotás Krisztiánnak, valamint édesapámnak, id. Dr. Szunyogh Lászlónak a cikk kéziratának gondos átolvasásáért és értékes tanácsaikért, illetve Dr. Simon Eszternek, hogy folyó kutatásainak egy szép eredményét (3. *ábra*) rendelkezésemre bocsátotta.

Kulcsszavak: *nanomágnesség, mágneses nano-szerkezetek és nanorészecskék, mágneses kölcsönhatások, spinmodellek, szuperparamágnesség, ultranagy sűrűségű mágneses adattárolás, spintronika, óriás mágneses ellenállás, spinnyomaték-átvitel, Dzsalsinszkij–Moriya-kölcsönhatás, spinspirálok, skyrmionok*

## IRODALOM

- Bakonyi Imre – Simon Eszter – Péter László (2008): Az óriás mágneses ellenállás felfedezése (1988) – A spintronika nyitánya – A 2007. évi fizikai Nobel-díj és háttere. *Fizikai Szemle*. LVIII, 2, 41–45. • <http://www.old.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0802/bakonyi0802.html>
- Bode, Matthias et al. (2007): Chiral Magnetic Order at Surfaces Driven by Inversion Asymmetry. *Nature*. 447, 190–193. doi:10.1038/nature05802
- Cserti József (2008): Nobel-díj az ellenállásért. *Természet Világa*. 139, 4. • <http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2008/tv0804/cserti.html>
- Dzyaloshinsky, Igor E. (1958): A Thermodynamic Theory of "Weak" Ferromagnetism of Antiferromagnets. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 4, 241–255. DOI:10.1016/0022-3697(58)90076-3
- Everspin (2012): *Spin-Torque MRAM*. • <http://everspin.com/spinTorqueMRAM.php>
- Fert, Albert et al. (2013): Skyrmions on the Track. *Nature Nanotechnology*. 8, 152–156. doi:10.1038/nnano.2013.29
- Heinze, Stefan et al. (2011): Spontaneous Atomic-scale Magnetic Skyrmion Lattice in Two Dimensions. *Nature Physics*. 7, 713–718. doi:10.1038/nphys2045 • <http://wigner.elte.hu/science/pub/NaturePhysics>.

- 2045\_feiriii\_skyrmion.pdf
- Moriya, Tōru (1960): Anisotropic Superexchange Interaction and Weak Ferromagnetism. *Physical Review*. 120, 91–98. DOI: 10.1103/PhysRev.120.91
- Nowak, Ulrich (2007): Classical Spin Models. In: Helmut Kronmüller – Stuart Parkin (eds.): *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*. Vol. 2. 858–876.
- Seagate (2012): *Seagate Reaches 1 Terabit Per Square Inch Milestone In Hard Drive Storage With New Technology Demonstration*. • <http://www.seagate.com/about/newsroom/press-releases/terabit-milestone-storage-seagate-master-pr/>
- Skomski, Ralph (2003): Nanomagnetism. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 15, R841–R896. doi: 10.1088/0953-8984/15/20/202
- Udvardi László – Szunyogh László (2009): Chiral Asymmetry of the Spin-wave Spectra in Ultrathin Magnetic Films. *Physical Review Letters*. 102, 207204 (4) DOI:10.1103/PhysRevLett.102.207204 • [http://arxiv.org/pdf/0901.2671.pdf?origin=publication\\_detail](http://arxiv.org/pdf/0901.2671.pdf?origin=publication_detail)
- Wiesendanger, Roland (2009): Spin Mapping at the Nanoscale and Atomic Scale. *Review of Modern Physics*. 81, 4, 1495–1550.