

# Skyrmioni magnetici

(Magnetic Skyrmions)

(Full text in Romanian)

Titu-Marius I. BĂJENESCU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prof. Eng., *Doctor Honoris Causa* of Military Technical Academy of Romania and of Technical University of Republic of Moldova (Chișinău); *Romanian Academy „Tudor Tănăsescu” Prize Laureat*

## Abstract

Magnetic skyrmions are particle-like nodes of magnetization. Because of their particular topological and physical properties, they are one of the most exciting objects in solid-state physics fundamental research. For potential applications in information technology, the current-driven movement of magnetic skyrmions is the focus of current research. On the other hand, new methods and mechanisms are being investigated to locally detect and manipulate skyrmions locally.

**Keywords:** Skyrmion bubbles, thin film, topological transitions, skyrmion-based spintronics.

*Received:* February 12, 2017

## To cite this article:

BĂJENESCU I. Titu-Marius, „Skyrmioni magnetici” (Magnetic Skyrmions), in *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2017, vol. 65, no. 3, pp. 11-16, ISSN 1582-5175.

## Istoric

În cursul celei de a doua jumătăți a secolului 19, celebrul fizician englez Kelvin, luând cunoștință de lucrările colegului german Hermann Helmholtz, a avut o idee genială.

Helmholtz tocmai arătase că inele de fluid în rotație erau destul de stabile și exersau unele asupra altora forțe care aminteau pe cele ale câmpurilor magnetice între fire conductoare parcurse de curenți electrici.

Kelvin va deduce că atomii erau de fapt filamente de fluide în rotație în jurul unui ax central, formând diferite noduri, câte unul pentru fiecare element chimic.

Fluidul transportor al acestor filamente era interpretat drept eter – mediul material al cărui stres și valuri ar fi trebuit să fie la originea câmpului electromagnetic.

Elegantă și atractivă, această teorie unitară s-a dovedit un eșec – așa cum aveau s-o arate dezvoltările teoriei cuantice a atomilor. Fizicienii au reținut totuși ideea că structurile stabile discrete puteau fi interpretate ca particule și ar putea reieși din ecuațiile neliniare – cum ar fi cele ale lui Navier-Stokes – care descriu câmpuri continue.

În cursul secolului 20, fizicianul englez Skyrme a încercat să explice existența și proprietățile nucleonilor (așadar ale protonilor și neutronilor) folosindu-se de așa numiții skyrmioni. Era vorba, din nou, de structuri stabile legate de un moment cinetic de rotație într-un câmp. Un nou eșec.

Totuși, teoreticienii și-au dat seama că echivalenții ai skyrmionilor ar putea exista în medii magnetice. Ba chiar i-au găsit, în urmă cu câțiva ani, în medii magnetice cu două dimensiuni (fig. 1) potențiale.

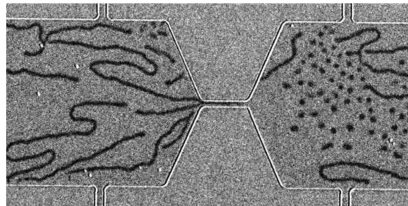


Figura 1. Skyrmioni în medii magnetice cu două dimensiuni

Pentru realizarea acestei imagini a fost folosit un dispozitiv de imaginerie magnetică cu efect Kerr magneto-optic. În partea stângă se observă benzi magnetizate într-un material magnetic, iar în partea dreaptă skyrmionii, sub formă de bule. © Wanjun Jiang, Argonne National Laboratory. Interesul descoperirii va consta în viitoarele aplicații.

## Câteva explicații utile

În urmă cu vreo cincizeci de ani (era prin 1962), înainte de apariția teoriei cromodinamice cuantice, fizicianul Tony Skyrme încerca să înțeleagă mai bine natura nucleonilor și a forțelor nucleare puternice. Se știa deja că protonii și neutronii erau fermioni – având spin pe jumătate – și că ei schimbau un fel de fotoni – faimosul boson al lui Yukawa cu spin întreg, pionul (cel mai ușor dintre mesoni sau mesonul pi).

Tot cam atunci, Heisenberg căuta să înțeleagă mai bine forțele nucleare, mergând însă mai departe. El considera o ecuație de câmp fundamental neliniar, bazată pe un câmp de fermioni – care trebuia să conțină toate particulele materiei și de forță cunoscută la cea epocă. În această teorie unificată, fotonii și gravitonii, de pildă, erau văzuți ca niște pachete de fermioni cu un moment cinetic intrinsec (un spin) cu valorile respective 1 și 2; ei puteau fi efectiv stări legate de un număr par de fermioni cu spin  $\frac{1}{2}$ .

Skyrme urmărea o abordare mai modestă, dar semnificativă; el nu se ocupa decât de barioni și de forțele

nucleare. Și el considera o ecuație neliniară, dar al cărei câmp fundamental era cel al unui boson cu spin nul, pionul lui Yukawa. La prima vedere, ideea pare absurdă: cum să obții particule cu spin  $\frac{1}{2}$  plecând de la stări compuse din particule cu spin nul?

Aici intervine caracterul neliniar al ecuației. Tot așa cum într-un fluid (descriș și el printr-o ecuație neliniară Navier Stokes), se pot forma vârtejuri stabile cu un moment cinetic, s-ar putea considera protonii și neutronii ca un fel de vârtejuri într-un fluid de pioni. Aceste configurații – care aduc aminte de cele ale solitoanelor – se numesc astăzi skyrmioni - în cinstea lui Tony Skyrme care a demonstrat teoretic existența lor.

Skyrmionul este o suprapunere cuantică de barioni și de stări de rezonanță, altfel spus un vârtej de spin (sau vortex) pe o suprafață, care poate fi creat de vârful unui microscop cu efect tunel. Fizicienii germani l-au descoperit sub forma vortexului de spin.

Barion vine de la grecesul *barys* care înseamnă greu; asta spune că barionii sunt, în general, mai grei decât celelalte tipuri de particule. Barion este un nume generic dat tuturor particulelor de masă egală sau superioară cu masa protonului sau neutronului. Din punct de vedere electric ele sunt neutre sau încărcate și participă la interacțiunile puternice.

Particulele care interacționează la interacțiune puternică se numesc hadroni. Această clasificare generală include mezonii și barionii, dar exclude leptonii, care nu interacționează la forță puternică. Interacțiunea slabă acționează și asupra hadronilor și asupra leptonilor.

Barionii țin de familia hadronilor, sunt așadar alcătuiți din quarkuri<sup>1</sup>, iar spinul lor se măsoară cu jumătăți de numere întregi, ceea ce îi categorisește la fermioni. Ca hadroni, barionii sunt sensibili la interacțiune puternică. Ca fermioni, ei sunt supuși principiului excluziunii al lui Pauli și au fost descriși de statisticile lui Fermi-Dirac.

În fizica particulelor prin barion se înțelege o categorie de particule formată din trei quarkuri, din care cei mai cunoscuți sunt protonul și neutronul. Barionii au fiecare propria lor antiparticulă (antibarionii), constituită din trei antiquarkuri.

Mezonul este o particulă elementară instabilă, neutră sau cu sarcină electrică, având masa cuprinsă între masa electronului și cea a protonului. Mezonii sunt particule de masă intermediară alcătuite dintr-o pereche quark-antiquark. O combinație de quarkuri se numește barion. Mezonii sunt bosoni, în timp ce barionii sunt fermioni. Dovezi experimentale recente arată existența unor combinații de cinci quarkuri; ele au fost denumite pentaquarkuri. Pentaquarkul este compus din patru quarkuri și un antiquark, ca o combinație a unui barion obișnuit plus un mezon.

Barionii sunt diferiți de mezoni prin aceea că mezonii sunt compuși doar din două quarkuri. Barionii și mezonii sunt incluși în clasa generală cunoscută sub numele de hadroni, particule care interacționează la forță puternică. Barionii sunt fermioni, în timp ce mezonii sunt bosoni.

Bosonul este o particulă nucleară elementară al cărei spin se măsoară cu numere întregi.

<sup>1</sup> Quarkul este o particulă elementară ipotetică, încă neidentificată, cu sarcina fracționară ( $1/3$  sau  $2/3$  din cea a electronului), considerată dintre „cărămizile ultime” ale

## Importanța skyrmionilor

Memoriile magnetice pe bază de skyrmioni au fost inițial prezise în 1989 și descoperite de fizicieni germani, în anul 2009, funcționând la temperaturi foarte scăzute ( $-250^{\circ}\text{C}$ ) ca materiale cristaline. De atunci, specialiștii în memorii au fost excitați de ideea unor memorii care să poată funcționa la temperatura camerei; aceasta s-a întâmplat în anul 2013 și a schimbat cu totul datele inițiale ale problemei.

În general, memoriile magnetice permit deja să se stocheze o importantă cantitate de informație cu pachete de atomi. Se presupune că dimensiunile acestor pachete vor putea fi reduse în continuare, mărind simultan capacitatea lor de stocare. Pentru îndeplinirea acestui deziderat, una din căile de cercetare este aceea de a face să intervină skyrmionii. De curând, fizicienii au găsit calea de a le realiza din materiale magnetice, la temperatura camerei.

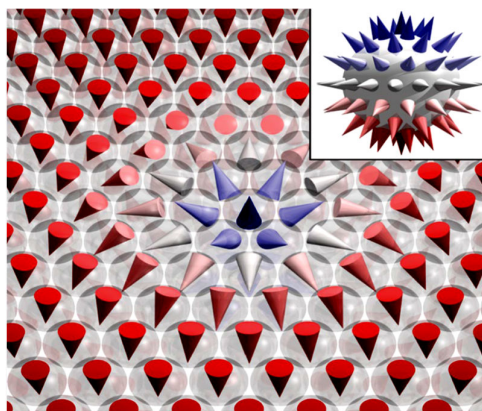


Figura 2. Topologia skyrmionilor magnetici

Spinul din centrul unui skyrmion este orientat opus magnetizării din mediul său, tranziția între ele se face prin rotație treptată, iar conurile indică respectivele direcții de magnetizare. Dacă toate direcțiile de rotație sunt vizualizate simultan (vedeți partea dreaptă sus), se obține o bilă unitate. Numărul de rotații topologice este în consecință "1", spre deosebire de "0" pentru un feromagnet cu spini paraleli. Îi numim topologici deoarece printr-o deformare continuă este imposibil să se transforme o distribuție de săgeți într-alta fără vârtejuri, tot așa cum o sferă nu poate deveni un tor cu discontinuitate, o gaură (vezi și fig. 3, *infra*) [32].

Într-adevăr, într-un mediu magnetic atomii sunt ca niște mici magneți cu săgeți îndreptate în aceeași direcție. Un asemenea pachet de atomi formează o zonă magnetizată (fig. 2, *infra*). Ne putem deci servi de medii magnetice pentru a transporta zone magnetizate în direcții opuse și după linii paralele. Două zone magnetizate în aceste direcții transportă în acest fel biți de informații diferite, 0 și 1. Tot astfel, putem proceda cu skyrmionii magnetici, în două dimensiuni, unde-i putem vedea ca vârtejuri magnetice învârtindu-se în două sensuri opuse (fig. 3 și 4).

materiei; existența sa a fost postulată de fizicienii americani M. Gell-Mann și George Zweig în 1964.

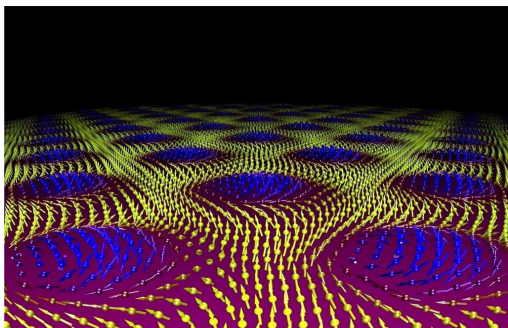


Figura 3. Exemplu de skyrmioni apăruiți într-o rețea de atomi magnetici bidimensionali imersați într-un câmp magnetic  
© Technische Universität München (TUM).

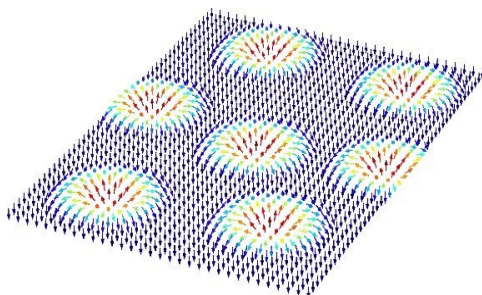


Figura 4. O matrice de cercuri magnetice pe un fundal uniform magnetizat

Ca mici magneți, orientarea lor magnetică este dată de săgeți (în albastru și galben). Tipurile de vârtejuri locale sunt formate din solitoni. În numim topologici deoarece printr-o deformare continuă este imposibil să se transforme o distribuție de săgeți în alta fără vartejuri, tot așa cum o sferă nu poate deveni un tor cu discontinuitate, o gaură.

Este interesant că acești skyrmioni pot fi obținuți cu mici pachete de atomi, permițând stocarea datelor cu memorii magnetice mai performante decât cele cunoscute.

#### Skyrmioni sub formă de bule magnetice

Până de curând, skyrmionii magnetici fabricați în laborator nu existau decât la temperaturi extrem de joase și trebuia utilizată microscopia cu efect tunel polarizat în spin pentru a-i manipula. De curând, așa cum a explicat o echipă de fizicieni americani într-un articol publicat în revista Science [34], cercetătorii au reușit să producă skyrmioni la temperatura camerei și să-i manipuleze cu ușurință, cu ajutorul unor curenți electrici. În acest scop, ei au fabricat un filament cu un fel de strangulare a sandwich-ului realizat de un strat de material magnetic așezat între un strat de tantal și un strat de oxid de tantal. Structuri magnetizate sub formă de bandă se pot forma în materialul magnetic și – așa cum se poate vedea din fig. 5 – aceste structuri se deformează sub acțiunea curenților electrici. În cele din urmă, dispozitivul pus la punct suflă bule de skyrmioni (prin asemănare cu formarea bulelor de săpun).

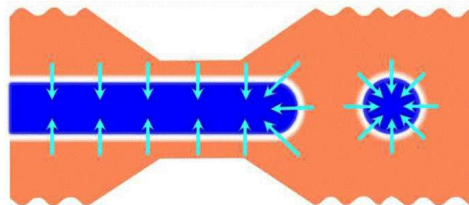


Figura 5. Cu albastru închis este reprezentată o bandă magnetizată într-un material magnetic care este întins. Săgețile (albastru deschis) indică direcția magnetizării. În partea dreaptă: un skyrmion nou format, sub formă de balon magnetic.  
© Wanjun Jiang, Argonne National Laboratory

Materialele folosite sunt materiale utilizate pe larg în industrie, iar curenții electrici necesari pentru deplasarea skyrmionilor sunt mult mai mici decât cei din memoriile racetrack (un tip de memorie nevolatilă, în curs de dezvoltare la IBM). Cu acest sistem se pot explora multe din ideile teoretice asupra fizicii skyrmionilor care au fost propuse în ultimii ani.

#### Promisiunile se adevăresc

Stabilitatea skyrmionilor este proprietatea care le face deosebit de promițători. Ca și în cazul multor tehnologii emergente, ceea ce este important este că reprezintă un dispozitiv care poate să dețină mai multe informații, utilizând mai puțină energie. Skyrmionii sunt de dimensiuni foarte mici și sunt foarte stabili.

Potențialul de dezvoltare constă în aceea că ei sunt nu numai dispozitive de memorie nevolatilă mai mici, dar mai mici cu un ordin de mărime. Skyrmionii ar putea afecta foaia de parcurs pentru câteva decenii.

Cercetătorii au pus la punct o nouă platformă multistratură formată prin suprapunerea de filme subțiri pentru skyrmioni. Ea se compune dintr-o stivuire secvențială a straturilor de Ir, Fe, Co și Pt (fig. 6). Această structură cu patru straturi este repetată de mai multe ori pentru a genera structura multistratură completă, folosind tehnici de pulverizare catodică pe un substrat de siliciu compatibil cu CMOS. Acest proces de fabricație este folosit în prezent pentru a dezvolta dispozitive de memorie care urmează a fi curând comercializate.

Cercetătorii de la Agenția pentru știință, tehnologie și cercetare din Singapore (A\*STAR) și Universitatea Tehnologică Nanyang (NTU) au realizat un film subțire care permite utilizatorului să creeze un dispozitiv de memorie pe bază de skyrmioni.

Cercetătorii au redactat documentul A\*STAR/NTU care descrie modul în care ei au reușit să detecteze skyrmionii, mici particule cu structuri magnetice care sunt de 400 de ori mai mici decât o celulă de sânge. Ele pot fi realizate cu materiale magnetice, iar stabilitatea lor la dimensiuni atât de mici le face candidați ideali pentru viitoarele dispozitive de memorie.

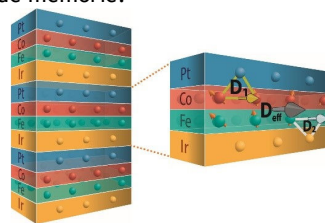


Figura 6. Stânga: stiva cu o secvență de straturi Ir, Fe, Co și Pt. Dreapta: Zoom-ul unei stive Ir/Fe/Co/Pt.

Pentru folosirea skyrmionilor într-o aplicație, trebuie să facem un pas mai departe și să specificăm direcția procesului de comutare. Un alt sistem material constă dintr-un strat de fier având o grosime de trei straturi atomice pe un singur cristal de Ir (111). El produce fascicule care au forma bobelor de fasole (fig. 7).

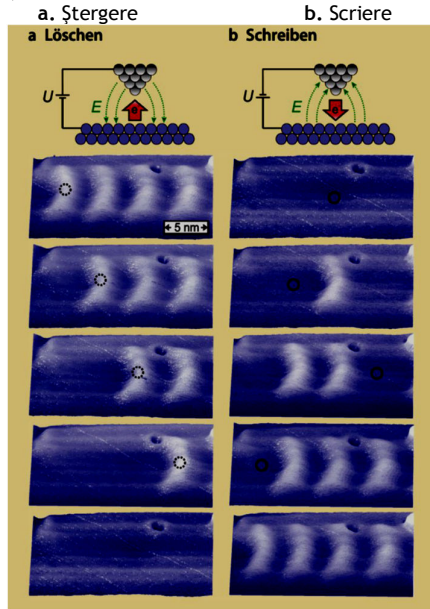


Figura 7. Comutare direcționată între stările magnetice și câmpul electric [32]; a) schița principală și realizarea experimentală a ștergerii; b) scrierea skyrmionilor magnetici de forma bobului de fasole

Într-un magnet convențional, momentele magnetice (sau spinii) sunt toate orientate paralel unele față de altele pentru a forma o stare magnetică uniformă de dimensiuni arbitrare. În contrast, un skyrmion este o structură de spin cu dimensiuni finite. Spinul din centrul cercului este îndreptat în sens opus fundalului. Spinii se învârtesc în jurul centrului iar orientarea spre fundal este lin restabilită. Spinii din skyrmion se învârtesc în jurul centrului asemănător cu un vârtej generat într-un bazin cu apă.

Dar este mai util să ne gândim la cercuri cu privire la comportamentul lor emergent. Se comportă ca niște particule magnetice la scară nanometrică care pot fi văzute cu microscopie magnetică. Se pot auto-organiza în diverse aranjamente sau grile ordonate, pot fi create individual, mutate și șterse cu curenți electrici. Ei sunt ca niște piese de pe o tablă de șah.

Platforma materială permite controlul direct al interacțiunilor magnetice care guvernează proprietățile skyrmionilor prin simpla variere a grosimii straturilor constitutive. Aceasta permite varierea dimensiunilor skyrmionilor cu un factor 2, iar stabilitatea și densitatea lor cu un factor 10. Cercetătorii au putut astfel să realizeze configurații personalizate de skyrmioni folosind tehnici de fabricație compatibile cu cele industriale. Cercetătorii au demonstrat, de asemenea, detectarea electrică a skyrmionilor ambiențiali, cunoscută sub numele de efect Hall, care este esențială pentru realizarea de aplicații cu acest dispozitiv.

În urmă cu doi ani, A\*STAR și NTU au inițiat un

program comun de cercetare asupra skyrmionilor, urmat de un program de experiențe și de simulări pentru a identifica un set special de multistraturi ca fiind ideal pentru rezolvarea problemei. Rezultatul a fost un material unic pentru realizarea de skyrmioni reglabili.

Și, deși, în 2015 și 2016, mai multe grupuri de cercetători din întreaga lume au descoperit skyrmioni la temperatura camerei, ele nu au reușit să dezvolte reglarea proprietăților skyrmionilor sau detectarea electrică, ceea ce reprezintă o cerință esențială pentru trecerea de la filme la dispozitive. Și Lawrence Berkeley National din California colaborează cu A\*STAR și NTU pentru cercetările lor în materie de skyrmioni.

## Concluzii

Următoarele obstacole pe care cercetătorii trebuie să le învingă sunt legate de fabricarea dispozitivelor, asigurând în același timp consistența proprietăților magnetice. Detaliile mecanismelor fizice care reglementează stabilizarea skyrmionilor în nanostructuri și lectura și scrierea lor rămân să fie deplin stabilite.

Nu putem specula asupra termenelor, în ciuda faptului că cercetătorii sunt destul de optimiști. Odată ce ei vor putea demonstra lectura și scrierea determinată a skyrmionilor în dispozitive cu parametri electrici rezonabili și care vor demonstra scalabilitatea și reproductibilitatea acestor fenomene, tehnologia ar trebui să fie coaptă pentru comercializare.

Skyrmionii magnetici sunt promițători pentru construirea de memorii magnetice de ultimă generație și a dispozitivelor spintronice, datorită stabilității lor, dimensiunilor mici și curenților extrem de mici necesari pentru a-i pune în mișcare. În special, memoria racetrack bazată pe skyrmioni este deosebit de interesantă pentru tehnologia informației, în care skyrmionii sunt folosiți pentru a stoca informații ca biți de date.

## References

- [1] Skyrme, T. H. A non-linear field theory. *Proc. R. Soc. Lond. A* **260**, 127-138(1961).
- [2] Wright, D. C. & Mermin, N. D. Crystalline liquids—the blue phases. *Rev. Mod. Phys.* **61**, 385-432 (1989).
- [3] Al'Khawaja, U. & Stoof, H. T. C. Skyrmions in a ferromagnetic Bose-Einstein condensate. *Nature* **411**, 918-920 (2001).
- [4] Sondhi, S. L., Karlhede, A., Kivelson, S. A. & Rezayi, E. H. Skyrmions and the crossover from the integer to the fractional quantum Hall effect at small Zeeman energies. *Phys. Rev. B* **47**, 16419-19426 (1993).
- [5] Brey, L., Fertig, A. H., Côté, R. & MacDonald, A. H. Skyrme crystal in a two-dimensional electron gas. *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2562-2565 (1995).
- [6] Abrikosov, A. A. Nobel lecture: Type-II superconductors and the vortex lattice. *Rev. Mod. Phys.* **76**, 975-979 (2004).
- [7] Bogdanov, A. N. & Yablonskii, D. A. Thermodynamically stable 'vortices' in magnetically ordered crystals. The mixed state of magnets. *Sov. Phys. JETP* **68**, 101-103 (1989).
- [8] Mühlbauer, S. et al. Skyrmion lattice in a chiral magnet. *Science* **323**, 915-919 (2009).
- [9] Yu, X. Z. et al. Real space observation of a two-dimensional skyrmion crystal. *Nature* **465**, 901-904 (2010).
- [10] Yu, X. et al. Near room-temperature formation of a skyrmion crystal in thin-films of the helimagnet FeGe. *Nature Mater.* **10**, 106-109 (2010).
- [11] Pappas, C. et al. Chiral paramagnetic skyrmion-like phase in MnSi. *Phys. Rev. Lett.* **102**, 197202 (2009).
- [12] Röbber, U. K., Bogdanov, A. N. & Pfleiderer, C. Spontaneous skyrmion ground states in magnetic metals. *Nature* **442**, 797-801 (2006).

- [13] Bode, M. *et al.* Chiral magnetic order at surfaces driven by inversion asymmetry. *Nature* **447**, 190-193 (2007).
- [14] Ferriani, P. *et al.* Atomic-scale spin spiral with a unique rotational sense: Mn monolayer on W(001). *Phys. Rev. Lett.* **101**, 027201 (2008).
- [15] Binz, B. & Vishwanath, A. Theory of helical spin crystals: Phases, textures, and properties. *Phys. Rev. B* **74**, 214408 (2006).
- [16] Han, J. H., Zang, J., Yang, Z., Park, J-H. & Nagaosa, N. Skyrmion lattice in a two-dimensional chiral magnet. *Phys. Rev. B* **82**, 094429 (2010).
- [17] Pfleiderer, C. & Rössler, U. K. News & Views, Condensed matter physics: Let's twist again. *Nature* **447**, 157-158 (2007).
- [18] von Bergmann, K. *et al.* Observation of a complex nanoscale magnetic structure in a hexagonal Fe monolayer. *Phys. Rev. Lett.* **96**, 167203 (2006).
- [19] Ye, J. *et al.* Berry phase theory of the anomalous Hall effect: Applications to colossal magnetoresistance manganites. *Phys. Rev. Lett.* **83**, 3737-3740 (1999).
- [20] Ward, R. S. Stable topological skyrmions on the 2D lattice. *Lett. Math. Phys.* **35**, 385-393 (1995).
- [21] Abanov, A. & Pokrovsky, V. L. Skyrmion in a real magnetic film. *Phys. Rev. B* **58**, R8889-R8892 (1998).
- [22] Heinze, S. *et al.* Real-space imaging of two-dimensional magnetism on the atomic-scale. *Science* **288**, 1805-1808 (2000).
- [23] Wortmann, D., Heinze, S., Kurz, Ph., Bihlmayer, G. & Blügel, S. Resolving complex atomic-scale spin structures by spin-polarized scanning tunneling microscopy. *Phys. Rev. Lett.* **86**, 4132-4135 (2001).
- [24] MacDonald, A. H., Girvin, S. M. & Yoshioka, D.  $t/U$  expansion for the Hubbard model. *Phys. Rev. B* **37**, 9753-9756 (1988).
- [25] Dzyaloshinskii, I. E. Thermodynamic theory of weak ferromagnetism in antiferromagnetic substances. *Sov. Phys. JETP* **5**, 1259-1262 (1957).
- [26] Moriya, T. Anisotropic superexchange interaction and weak ferromagnetism. *Phys. Rev.* **120**, 91-98 (1960).
- [27] Fert, A. & Levy, P. A. Role of anisotropic exchange interactions in determining the properties of spin glasses. *Phys. Rev. Lett.* **44**, 1538-1541 (1980).
- [28] Heide, M., Bihlmayer, G., Mavropoulos, Ph., Bringer, A. & Blügel, S. *Spin-orbit Driven Physics at Surfaces* (Newsletter of the Psi-K Network, Vol. 78, 2006); [www.psi-k.org/newsletters/News\\_78/Highlight\\_78.pdf](http://www.psi-k.org/newsletters/News_78/Highlight_78.pdf).
- [29] Bode, M. *et al.* Magnetization-direction dependent local electronic structure probed by scanning tunneling spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.* **89**, 237205 (2002).
- [30] von Bergmann, K. *et al.* Complex magnetism of the Fe monolayer on Ir(111). *New J. Phys.* **9**, 396 (2007).
- [31] Stefan Heinze, Kirsten von Bergmann, Matthias Menzel, Jens Brede, André Kubetzka, Roland Wiesendanger, Gustav Bihlmayer & Stefan Blügel, "Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions," *Nature Physics* **7**(2011), 713-718.
- [32] Kirsten von Bergmann, André Kubetzka, Knoten in der Magnetisierung, *Physik in unserer Zeit*, Vol. 48(2. Mai 2017), Issue 3, DOI: 10.1002/piuz.201701468
- [33] Heiko Fuchs, Roland Wiesendanger, Mit Skyrmionen in die Zukunft, 12.04.2017, <http://www.git-labor.de/forschung/informationstechnologie-it/mit-skyrmionen-die-zukunft>
- [34] Taro Nakajima, et al., Skyrmion lattice structural transition in MnSi, *Science Advances* 09 Jun 2017: Vol. 3, no. 6, e1602562, DOI: 10.1126/sciadv.1602562
- [35] Tsymbal, E. Y. Spintronics: Electric toggling of magnets. *Nat. Mater.* **11**, 12-13 (2012).
- [36] Matsukura, F., Tokura, Y. & Ohno, H. Control of magnetism by electric fields. *Nat. Nanotech.* **10**, 209-220 (2015).
- [37] Zhang, S. Spin-dependent surface screening in ferromagnets and magnetic tunnel junctions. *Phys. Rev. Lett.* **83**, 640-643 (1999).
- [38] Weisheit, M. *et al.* Electric field-induced modification of magnetism in thin-film ferromagnets. *Science*, **315**, 349-351 (2007).
- [39] Brovko, O. O., Ruiz-Díaz, P., Dasa, T. R. & Stepanyuk, V. S. Controlling magnetism on metal surfaces with non-magnetic means: electric fields and surface charging. *J. Phys. Condens. Matter* **26**, 093001 (2014).
- [40] Duan, C.-G. *et al.* Surface magnetoelectric effect in ferromagnetic metal films. *Phys. Rev. Lett.* **101**, 137201 (2008).
- [41] Nakamura, K. *et al.* Giant modification of the magnetocrystalline anisotropy in transition-metal monolayers by an external electric field. *Phys. Rev. Lett.* **102**, 187201 (2009).
- [42] Oba, M. *et al.* Electric-field-induced modification of the magnon energy, exchange interaction, and Curie temperature of transition-metal thin films. *Phys. Rev. Lett.* **114**, 107202 (2015).
- [43] Eerenstein, W., Mathur, N. D. & Scott, J. F. Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature* **442**, 759-765 (2006).
- [44] Gerhard, L. *et al.* Magnetoelectric coupling at metal surfaces. *Nat. Nanotech.* **5**, 792-797 (2010).
- [45] Maruyama, T. *et al.* Large voltage-induced magnetic anisotropy change in a few atomic layers of iron. *Nat. Nanotech.* **4**, 158-161 (2009).
- [46] Shiota, Y. *et al.* Induction of coherent magnetization switching in a few atomic layers of FeCo using voltage pulses. *Nat. Mater.* **11**, 39-43 (2012).
- [47] Wang, W.-G., Li, M., Hageman, S. & Chien, C. L. Electric-field-assisted switching in magnetic tunnel junctions. *Nat. Mater.* **11**, 64-68 (2012).
- [48] Bauer, U. *et al.* Magneto-ionic control of interfacial magnetism. *Nat. Mater.* **14**, 174-181 (2015).
- [49] Nagaosa, N. & Tokura, Y. Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions. *Nat. Nanotech.* **8**, 899-911 (2013).
- [50] von Bergmann, K., Kubetzka, A., Pietzsch, O. & Wiesendanger, R. Interface-induced chiral domain walls, spin spirals and skyrmions revealed by spin-polarized scanning tunneling microscopy. *J. Phys. Condens. Matter* **26**, 394002 (2014).
- [51] Fert, A., Cros, V. & Sampaio, J. Skyrmions on the track. *Nat. Nanotech.* **8**, 152-156 (2013).
- [52] Parkin, S. S. P., Hayashi, M. & Thomas, L. Magnetic domain-wall racetrack memory. *Science* **320**, 190-194 (2008).
- [53] Romming, N. *et al.* Writing and deleting single magnetic skyrmions. *Science* **341**, 636-639 (2013).
- [54] Jonietz, F. *et al.* Spin transfer torques in MnSi at ultralow current densities. *Science* **330**, 1648-1651 (2010).
- [55] Sampaio, J., Cros, V., Rohart, S., Thiaville, A. & Fert, A. Nucleation, stability and current-induced motion of isolated magnetic skyrmions in nanostructures. *Nat. Nanotech.* **8**, 839-844 (2013).
- [56] Hsu, P.-J. *et al.* Guiding spin spirals by local uniaxial strain relief. *Phys. Rev. Lett.* **116**, 017201 (2016).
- [57] Heinze, S. *et al.* Spontaneous atomic-scale magnetic skyrmion lattice in two dimensions. *Nat. Phys.* **7**, 713-718 (2011).
- [58] Heinze, S. Simulation of spin-polarized scanning tunneling microscopy images of nanoscale non-collinear magnetic structures. *Appl. Phys. A* **85**, 407-414 (2006).
- [59] Hanneken, C. *et al.* Electrical detection of magnetic skyrmions by tunnelling non-collinear magnetoresistance. *Nat. Nanotech.* **10**, 1039-1042 (2015).
- [60] Sonntag, A. *et al.* Electric-field-induced magnetic anisotropy in a nanomagnet investigated on the atomic scale. *Phys. Rev. Lett.* **112**, 017204 (2014).
- [61] Freimuth, F., Bamler, R., Mokrousov, Y. & Rosch, A. Phase-space Berry phases in chiral magnets:

## Biography



Titu I. BĂJENESCU was born in Câmpina (Romania) on April 2, 1933.

He received his engineering training at the Polytechnic Institute Bucharest.

He served for the first five years in the Romanian Army Research Institute, including tours on radio and telecom maintenance, and in the reliability, safety and maintainability office of the Ministry of Defence (main base ground facilities).

**R&D Experience:** design and manufacture of experimental equipments for Romanian Army Research Institute and for air defence system.

He joined Brown Boveri (today: Asea Brown Boveri) Baden (Switzerland) in 1969, as research and development engineer.

**R&D Experience:** design and manufacture of new industrial equipment for telecommunications. In 1974, he joined Hasler Limited (today: Ascom) Berne as Reliability Manager (recruitment by competitive examination).

**Experience:** Set up QRA and R&M teams. Developed policies, procedures and training. Managed QRA and R&M programmes. As QRA Manager monitoring and reporting on production quality and in-service reliability.

As Switzerland official, contributed to development of new ITU and IEC standards.

In 1981, he joined "Messtechnik und Optoelektronik" (Neuchâtel, Switzerland, and Haar, West Germany), a subsidiary of Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) Munich,

as Quality and Reliability Manager (recruitment by competitive examination).

**Experience:** Product Assurance Manager of "intelligent cables". Managed applied research on reliability (electronic components, system analysis methods, test methods, etc.).

Since 1985, he has worked as an independent consultant and international expert on engineering management, telecommunications, reliability, quality and safety.

Mr. Băjenescu is the author of many technical books - published in English, French, German and Romanian.

He is university professor and has written many papers and articles on modern telecommunications, and on quality and reliability engineering and management. He lectures as invited professor, visiting lecturer or speaker at European universities and other venues on these subjects.

Since 1991, he won many Awards and Distinctions, presented by the Romanian Academy, Romanian Society for Quality, Romanian Engineers Association, etc. for his contribution to reliability science and technology. Recently, he received the honorific titles of *Doctor Honoris Causa* from the *Romanian Military Academy* and from *Technical University of the Republic of Moldavia*.

In 2013, he obtained, together with prof. Marius Băzu (head of reliability laboratory of Romanian Research Institute for Micro- and Nano-technologies - IMT) the *Romanian Academy "Tudor Tănăsescu" prize* for the book *Failure Analysis*, published by John Wiley & Sons.