

カイラリティとナノ超構造



研究ノート

川村 光*

Chirality and nano-scale superstructure

Key Words : Chirality, Frustration, Superstructure,
Topological excitation

「フラストレーション」という言葉は、日常生活でも良く使われるお馴染みの言葉です。もっとも、通常あまり良い意味ではなく、物事が思い通りに行かずイライラしてフラストレーションが溜まる、といった感じで使われますが。フラストレーションというと、このようにとても人間臭い言葉なのですが、実は、物性物理学の分野でも近年「フラストレーション」という概念が注目されています [1-6]。幾何学的フラストレート磁性体と呼ばれる一連の磁性体が、その典型的な例です。図1に示したのは、3角形の各頂点に3個の磁気モーメント（スピン）があって、隣り合うスピン間には互いの向きを逆向きにしようとする“反強磁性的な”相互作用が働いている状況です。仮にスピンは「上向き」か「下向き」かの2つの状態のみを取るとすると（イジングスピン）、3角形上の全てのスピン対を互いに逆向きにすることは不可能で、どこかでエネルギーが上がってしまいます。「あちらを立てればこちらが立たず」という状況です。例えば図中?で示したスピンは、上を向こうが下を向こうが系のどこかで必ずエネルギーが上がってしまうわけで、これはフラストレーションそのものです。

上のイジングスピン例では、スピンの取り得る向きは上向きと下向きの2つのみとしましたが、多くの現実の磁性体では、スピンは“斜め”向きも取る

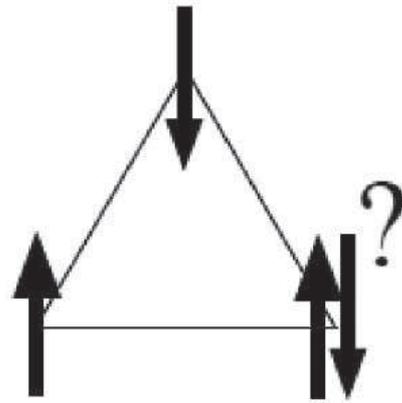


図1：3角形上の反強磁性的にカップルした3個のイジングスピン。

ことが出来ます。このようなより一般的なベクトルスピンの場合にフラストレーションがあると、スピンはお互いに傾いた構造を取ります。1個の3角形の例では、下図のように120°傾くこととなります。興味深いことに、スピンがこのような傾くと、それに伴って、スピンの周り—「右回り」か「左回り」か—の自由度が新たに出現します(図2)。この「右・左」の自由度のことを、「カイラリティ」と呼びます。このカイラリティ自由度は、フラストレーションのためスピンが単純な平行や反平行ではない傾いた構

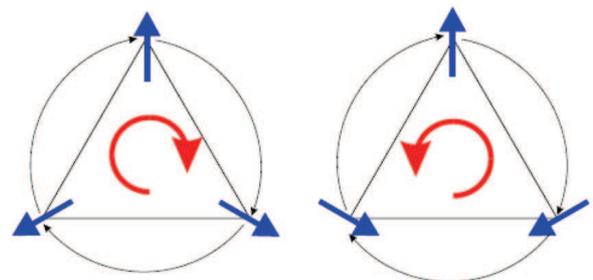


図2：3角形上の反強磁性的にカップルした3個のベクトルスピン。120度構造を形成する。右回り（カイラリティ+）と左回り（カイラリティ-）の構造がある。



* Hikaru KAWAMURA

1954年9月生
 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
 (1982年)
 現在、大阪大学理学研究科 宇宙地球科学専攻 教授 理学博士 物性理論
 TEL: 06-6850-5543
 FAX: 06-6850-5494
 E-mail: kawamura@ess.sci.osaka-u.ac.jp

造を形成したために初めて出現した、新たな内部自由度です。

実は、フラストレーションした磁性体—フラストレート磁性体—では、マクロなレベルでスピン系はしばしばカイラルな構造をとります。そのようなカイラルな構造のユニットは、通常、ナノスケールのオーダーとなります (ナノ超構造)。また、スピン系がフラストレーションのため形成する、このようなナノ超構造は、トポロジカルな安定性を持つことが多いのです。例えばカイラリティの「プラス・マイナス」は、スピン構造の「右・左」に対応していて、連続的な変形で壊したり変化させたりすることが出来ません。マクロな結晶中で実現されるカイラルなスピン超構造の例として、図3と4に、2つの例を挙げました。図3は「 Z_2 渦」と呼ばれるスピンの渦構造で、図2で示した単一の3角形上の120度構造が、中心コアの周りにぐるっと回転した構造になっています [7-9]。図4は「スカーミオン」と呼ばれる超構造で、遠方で上向きを向いたスピンの中央のコアでは下向きを向いており、途中のスピンは中央コアに向かって渦を巻きながら倒れこむような構造になっています [10-14]。いずれも、ナノスケールオーダーのトポロジカルに安定なスピン超構造です (トポロジカル励起、トポロジカル・テクスチャと呼ばれることもあります)。

このような、カイラリティ自由度を内包したトポロジカルに安定なナノ超構造は、フラストレート磁性体において、励起状態としてばかりでなく、しばしば、自由エネルギー最低の安定状態としても実現されます。例えば、図4に示したスカーミオンは、ある種の磁性体を適当な磁場と温度の条件下に置くと、スカーミオンが周期的に配列した安定な「スカーミオン結晶」を形成することが、観測されていま

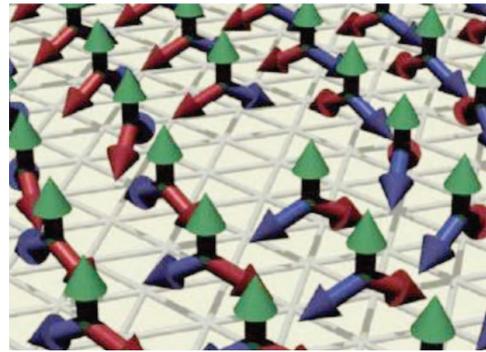


図3: Z_2 渦。

す。このような、フラストレーションが誘起するナノ超構造は、系の相構造といった熱力学的な性質のみならず、電気伝導等の輸送性質についても、フラストレーションがない系では見られないような新奇な性質を誘起します。

詳細に興味をお持ちの読者には引用文献をご覧頂くこととして、以下では、どのような性質が観測あるいは期待されているかについて、ごく大雑把に述べます。図3の Z_2 渦は、通常の巻き数ではなくパリティに対応する Z_2 トポロジカル量子数で特徴付けられるような大変奇妙な渦です。その対解離が、新奇なトポロジカル相転移 (ないしはクロスオーバー) を駆動すると期待されていますが [7,8]、その詳細については未だ良く判っていません。また、この Z_2 渦励起を含むトポロジカル励起のダイナミクスは、特に興味深い問題です。 Z_2 渦の場合、中性子散乱等で観測可能な動的構造因子に特徴的なパターンを与えることが予想されており、今後の測定が期待されます [9]。図4のスカーミオンは、近年集中的な研究が進み、その相構造やダイナミクスについて多くの新奇な性質が明らかになってきました [10-14]。ローレンツ電顕を用いたスカーミオン格

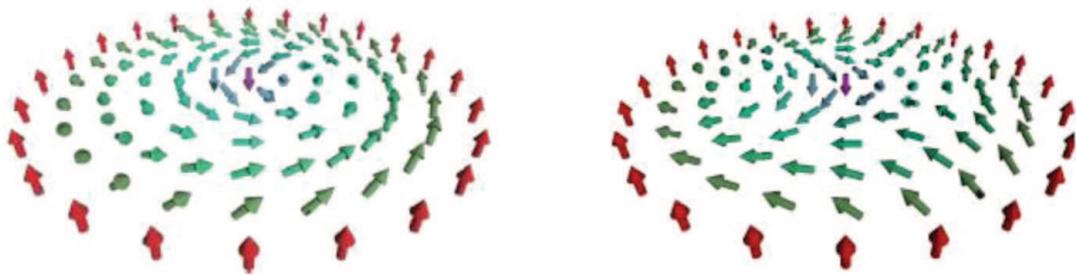


図4: スカーミオン (左) と反スカーミオン (右)。

子の直接撮像なども可能になっています。とりわけ、その電磁応答は興味深く、スカーミオン格子が巨大なトポロジカルホール効果（印加電流の横方向に電位差を生じる現象）を誘起したり、あるいはその反作用としてスカーミオン格子自体が横方向に動くといった効果（スカーミオン・ホール効果）も見出されています。

ところで、カイラリティにはプラス・マイナス（右・左）の別があった訳ですが、その右・左の自由度がカイラリティ起源のナノ超構造にはどのように反映されるのでしょうか？実はスカーミオンの場合には、カイラリティのプラス・マイナスは、「スカーミオン」に対する「反スカーミオン」として現れます。スカーミオンと反スカーミオンを、図4の左右に示しました。両者では、外側のスピンの中心に向かって倒れこむときの巻き方が逆になっています。この差は、例えば、ホール効果で誘起されるホール電圧の符号の差として現れます。実は、この反スカーミオンはある種の条件下でその存在が理論的に予想されていますが[14]、まだ実験的には観測されていません。今後の観測が期待されるところで

す。系にフラストレーションが存在するときには、系の安定状態や励起状態がナノスケールのカイラルな構造を持つというのは、そう特殊なケースではないと期待されます。その物性探査と制御に係る基礎研究は未だ始まったばかりですが、今後の大きな発展が期待される分野ではないかと思えます。ナノスケールの構造体を作成しその機能を利用するというのは、現代のテクノロジーの主流となっている方向です。通常、そのようなナノスケールの構造体は、ナノテクを駆使して人工的に作成するわけで、これは謂わば「トップダウン」の方法と言えるでしょう。これに対し、拙稿で紹介したナノ超構造は、フラストレーションにより系自体に自己生成される、謂わば「ボトムアップ」型とでもいうべきものです。地道な基礎研究の積み重ねがまだまだ必要な段階ですが、その制御と機能化は将来の新しい潮流を拓く可能性を秘めているのではないのでしょうか。

参考文献

- 1) *Frustrated Spin Systems* ed. by H.T. Diep (World Scientific Publishing, Singapore, 2004)
- 2) *Novel States of Matter Induced by Frustration* ed. by H. Kawamura, Special Topics, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 011001 (2010).
- 3) *Introduction to Frustrated Magnetism* ed. by C. Lacroix, P. Mendelse and F. Mila (Springer, Berlin 2011).
- 4) 「矛盾が引き起こすエキゾチックな現象：幾何学的フラストレーション」R. メスナー、A.P. ラミレス、川村光記、パリティ（丸善）21巻9号(2006) p.20.
- 5) 「フラストレート系の新物性」川村光、パリティ（丸善）22巻1号(2006) p.25.
- 6) 文部科学省・科学研究補助金・特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」ホームページ (<http://www.frustration.jp>)
- 7) H. Kawamura and S. Miyashita, J. Phys. Soc. Jpn. 53, 4138 (1984).
- 8) H. Kawamura, A. Yamamoto and T. Okubo, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 023701 (2010).
- 9) T. Okubo and H. Kawamura, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 084706 (2010).
- 10) U.K. Roßler, A.N. Bagdanov and C. Pfleiderer, Nature 442, 797 (2006).
- 11) S. Mühlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, and P. Böni, Science 323 915 (2009); W. Münzer, A. Neubauer, T. Adams, S. Mühlbauer, C. Franz, F. Jonietz, R. Georgii, P. Böni, B. Pedersen, M. Schmidt, A. Rosch, and C. Pfleiderer, Phys. Rev. B 81, 041203(R) (2010).
- 12) X. Z. Yu, Y. Onose, N. Kanazawa, J. H. Park, J. H. Han, Y. Matsui, N. Nagaosa, and Y. Tokura, Nature 465, 901 (2010); X. Z. Yu, N. Kanazawa, Y. Onose, K. Kimoto, W. Z. Zhang, S. Ishiwata, Y. Matsui, and Y. Tokura, Nature Mat. 10, 106 (2011); S. Seki, X. Z. Wu, S. Ishiwata and Y. Tokura, Science 336, 198 (2012).
- 13) S. Heinze, K. von Bergmann, M. Menzel, J. Brede, A. Kubetzka, R. Wiesendanger, G. Bihlmayer, and S. Blügel, Nature Phys. 7, 713 (2011).
- 14) T. Okubo, S. Chung and H. Kawamura, Phys. Rev. Letters, 108, 017206 (2012).