

PRESS RELEASE

2018年7月19日

理化学研究所
日本原子力研究開発機構
J-PARC センター
総合科学研究機構
東京大学

磁気渦の生成・消滅過程を 100 分の 1 秒単位で観測

ーJ-PARC MLF のパルス中性子を用いたストロボ撮影に成功ー

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター強相関量子構造チームの中島多朗研究員、有馬孝尚チームリーダー、強相関物性研究グループの十倉好紀グループディレクター、日本原子力研究開発機構 J-PARC センターの稲村泰弘副主任研究員、総合科学研究機構（CROSS）中性子科学センターの大石一城副主任研究員、伊藤崇芳副主任研究員、東京大学大学院工学系研究科の賀川史敬准教授、大池広志助教らの共同研究グループ*は、物質中の微小な磁気渦（「磁気スキルミオン^[1]」）が生成・消滅する過程を、100 分の 1 秒単位の時間分解能で観測することに成功しました。

本研究成果は、次世代の情報記憶媒体への応用が期待される磁気スキルミオンの基本的性質を理解する上で重要です。さらに新たに確立した観測手法は、磁気スキルミオン以外にもさまざまな機能性材料でごく短時間にのみ現れる現象を研究する手段として利用することが可能です。

今回、共同研究グループは、マンガンとケイ素からなる化合物 MnSi で現れる磁気スキルミオンに対して、急激な温度上昇・下降を与えた際に起こる変化の過程を、大強度陽子加速器施設（J-PARC）^[2]の「パルス中性子ビーム^[3]」を用いて観測しました。その結果、温度の上昇によって磁気スキルミオンが消滅する様子や、急速な冷却過程で生成されたスキルミオンが本来存在できない低温まで「過冷却^[4]」状態に残る様子などを、100 分の 1 秒単位の高い時間分解能で“ストロボ写真”のように観測することに初めて成功しました。

本研究は、国際科学雑誌『*Physical Review B*』の掲載に先立ち、オンライン版（7月23日付け：日本時間7月24日）に掲載されました。

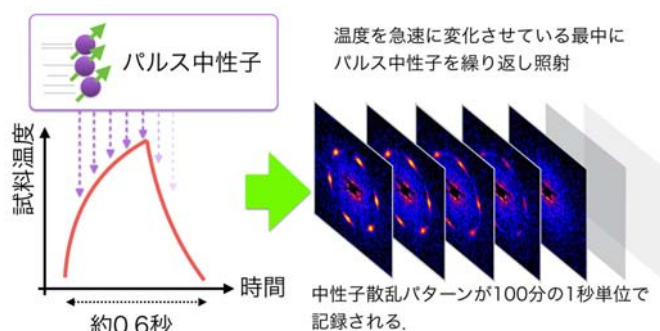


図 本実験で確立されたストロボスピック中性子小角散乱法の概念図

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター

強相関量子構造研究チーム

研究員 中島 多朗 (なかじま たろう)

チームリーダー 有馬 孝尚 (ありま たかひさ)

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻 教授)

強相関物質研究グループ

技師 吉川 明子 (きっかわ あきこ)

グループディレクター 田口 康二郎 (たぐち やすじろう)

強相関物性研究グループ

グループディレクター 十倉 好紀 (とくら よしのり)

(東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 教授)

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター

副主任研究員 稲村 泰弘 (いなむら やすひろ)

総合科学研究機構 中性子科学センター

研究開発部

副主任研究員 伊藤 崇芳 (いとう たかよし)

副主任研究員 大石 一城 (おおいし かずき)

サイエンスコーディネーター 加倉井 和久 (かくらい かずひさ)

東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻

准教授 賀川 史敬 (かがわ ふみたか)

(理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー)

助教 大池 広志 (おおいけ ひろし)

(理化学研究所 創発物性科学研究センター 客員研究員)

※研究支援

本研究は日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金基盤研究 S「分子性物質の可制御性を用いた領域横断型研究と境界領域の物性開拓 (研究代表者: 鹿野田一司)」による支援を受けて行われました。

1. 背景

「磁気スキルミオン」とは、磁性体における磁気モーメント (物質中の個々の原子が持つ小さな棒磁石) が渦状に配列したもので、典型的な大きさは数～数百ナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル) です。磁気スキルミオンは非常にわずかな電流を流すことで駆動できることから、磁気スキルミオンを情報記憶媒体として用いる新しい磁気メモリの開発などが提案されています。その一因には、磁気スキルミオンが渦であるため「1 個、2 個」と数えることができ、デジタル情報処理と相性が良いということも挙げられます。

磁気スキルミオンは 2009 年にその存在が実験的に報告され^{注 1)}、現在も世界中で盛んに研究されています。磁気スキルミオンの代表的な観測方法の一つに「中性子小角散乱法」があります。中性子小角散乱法では、磁気スキルミオンが物質中で数多く存在し、規則的に整列している (格子を組んでいる) 状態に対して、中性子ビームを照射します。すると、その磁気スキルミオン格子^[1]の形や大

きを反映した中性子の散乱パターンが得られます。これまでは、中性子ビームを数秒から数分照射し続け、時間的に平均化されたパターンを観測することがほとんどでした。しかしこれでは、磁気スキルミオンが生成・消滅する瞬間の様子など、非常に短い時間で起こっている過渡現象を観測することは不可能でした。

注 1) S. Muhlbauer *et al.*, Science **323**, 915 (2009).

2. 研究手法と成果

磁気スキルミオンを発見したドイツの研究グループは 2009 年に、マンガンとケイ素からなる化合物 MnSi において、 $-246^{\circ}\text{C} \sim -244^{\circ}\text{C}$ まで、わずか 2°C の温度範囲でのみ磁気スキルミオンが存在することを報告しました^{注 1)}。しかし、2016 年に賀川准教授、大池助教らは、MnSi を非常に速く冷却すると、本来磁気スキルミオンが存在しない -246°C 以下の範囲でも、磁気スキルミオンが「過冷却」の状態に残ることを実験的に明らかにしました^{注 2)}。このとき必要な温度変化のスピードは、数十～数百 $^{\circ}\text{C}$ 毎秒という非常に速いものでした。

この素早い温度変化を経る前と後で、電気抵抗測定や従来の中性子小角散乱測定を行うことで、磁気スキルミオンが過冷却状態になっていることが分かっていました^{注 3)}。しかし、実際にこのような短時間の温度変化中で磁気スキルミオンがどのように形成され、最終的に過冷却状態になったかという過程は直接観測されていませんでした。

共同研究グループはこの過程を直接観測するため、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質・生命科学実験施設 (MLF) に設置された中性子小角・広角散乱装置「大観」(BL15) (図 1) において、パルス中性子ビームを使った「ストロボスコピック中性子小角散乱測定」を行いました。これは写真の“ストロボ撮影”と同様に、時々刻々と変化している物質の磁気状態に中性子ビームの“フラッシュ”を繰り返し浴びせて、その瞬間ごとの様子を記録するというものです。J-PARC MLF では、陽子ビームを標的 (水銀) に衝突させて生成させたパルス状の中性子ビームを実験に用いることができます。

共同研究グループは、このパルス中性子と試料の温度変化を同期させる計測システムを構築し、磁気スキルミオンが形成され三角格子を組んだことに相当する六角形の散乱パターンが生じる過程を、パルス中性子が試料に当たる瞬間ごとに“パラパラ漫画”のように記録することに成功しました (図 2)。

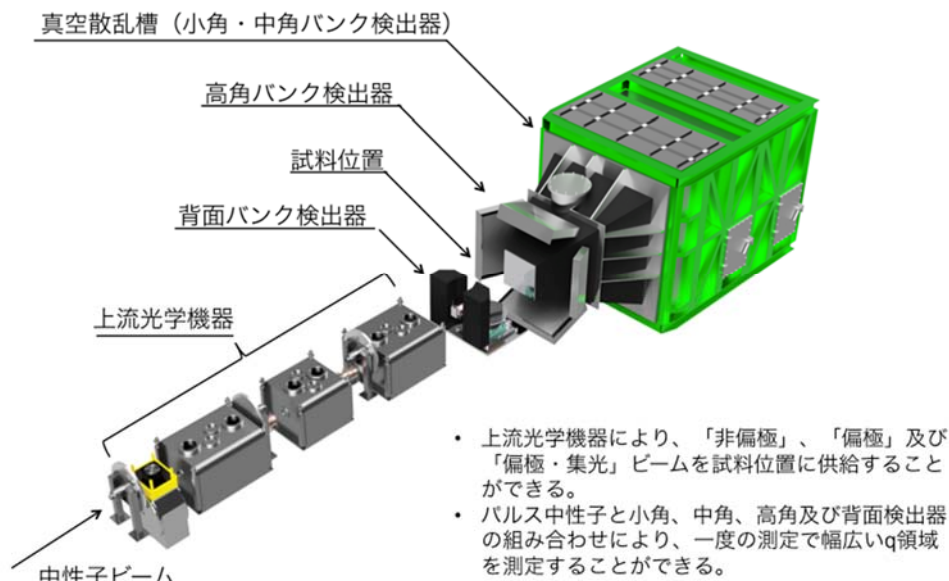


図1 J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) に設置されている

中性子小角・広角散乱装置「大観」の外観図

パルス中性子ビームが試料に照射され、試料で散乱された中性子のパターンを試料前方および後方に設置された数多くの検出器群によって効率的に観測することができる。これにより磁気スキルミオンをはじめとした磁性体中での物理現象や、さまざまな機能性材料の性質を測定することができる。

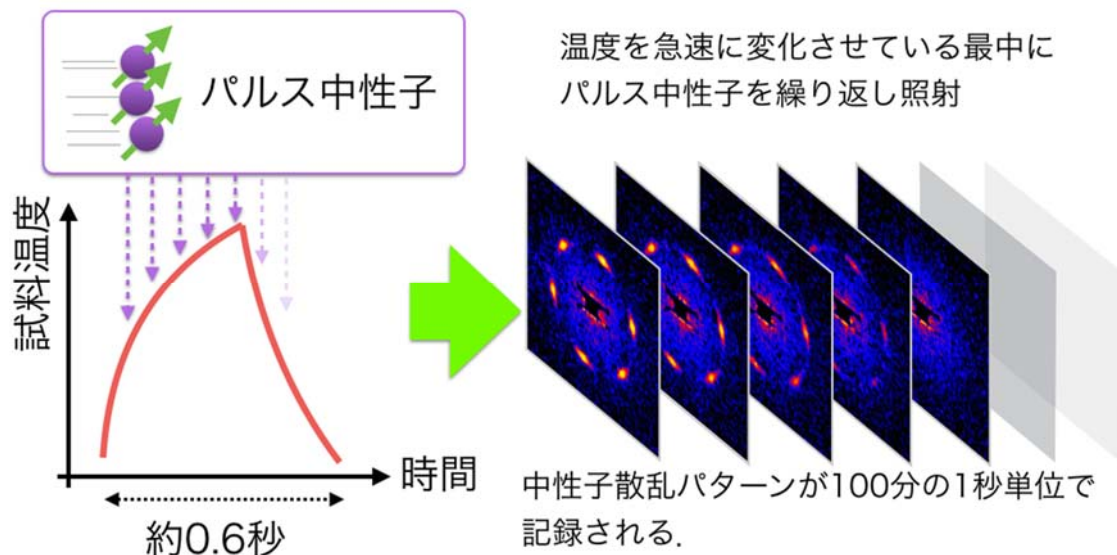


図2 本実験で確立されたストロボスコピック中性子小角散乱法の概念図

試料の温度変化とパルス中性子照射のタイミングを表した模式図。右側の図における破線の矢印は、温度の変化に対してパルス中性子が照射されたタイミングを模式的に表したものである。温度変化と同期してパルス中性子を繰り返し照射することにより、磁気状態の変化に対応する中性子散乱パターンを約100分の1秒

ごとにパラパラ漫画のように記録することができる。

実験では、一つのパルス中性子の照射時間は約 13 ミリ秒（1 ミリ秒は 1,000 分の 1 秒）にしたため、散乱パターンの変化を 100 分の 1 秒単位の高い時間分解能で観測したことになります。磁気スキルミオンが通常の条件で存在する温度領域（ -246°C ～ -244°C ）を横切るように -238°C から -253°C までの間を 50°C 毎秒で急速に試料を冷却しながら観測を行ったところ、常磁性状態（ -244°C 以上で、磁気モーメントがバラバラな方向を向いた状態）から磁気スキルミオンが生成される過程はこの速い温度変化にも追従して起こることが分かりました。これは磁気スキルミオンの生成が非常に高速であることを意味します。

また、一度できた磁気スキルミオンは壊れにくく、このような速い温度変化の下では -246°C を下回っても消滅することなく、過冷却状態となって残ることが分かりました。さらに、非常に速い温度変化の中でも磁気スキルミオン格子の間隔やそろい具合が刻々と変化している様子が観測されました。

注 2) H.Oike *et al.*, “Interplay between topological and thermodynamic stability in a metastable magnetic skyrmion lattice”, *Nat. Phys.* **12**, 62 (2016).

注 3) T. Nakajima, H. Oike *et al.*, “Skyrmion lattice structural transition in MnSi”, *Sci. Adv.* **3**, e1602562 (2017).

3. 今後の期待

今回の研究によって、磁気スキルミオンの生成と過冷却状態形成の過程が明らかになり、これはスキルミオン自身の基礎的な性質の理解と情報記憶媒体への応用の両面にとって、大きな役割を果たすと期待できます。

また、今回の実験では中性子小角散乱パターンを 100 分の 1 秒ごとに観測しましたが、実験条件によっては有効的なパルス幅を狭めることにより 1,000 分の 1 秒での観測も可能であることが示されました。この手法は磁気スキルミオンだけでなくさまざまな機能性材料の研究において、非常に短時間にだけ起こる物理現象を研究する手段として J-PARC MLF のパルス中性子が活用できることを示しており、今後の発展が期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Phase-transition kinetics of magnetic skyrmions investigated by stroboscopic small-angle neutron scattering

<著者名>

Taro Nakajima, Yasuhiro Inamura, Takayoshi Ito, Kazuki Ohishi, Hiroshi Oike, Fumitaka Kagawa, Akiko Kikkawa, Yasujiro Taguchi, Kazuhisa Kakurai, Yoshinori Tokura, and Taka-hisa Arima

<雑誌>

Physical Review B

<DOI>

10.1103/PhysRevB.98.014424

5. 補足説明

[1] 磁気スキルミオン、スキルミオン格子

「磁気スキルミオン」は、物質中の原子が持つ磁気モーメント（小さな棒磁石）が渦状に配列した状態のことを指す。磁気スキルミオンが固体中に多数生じている際に、格子状に規則的に配列している状態を「スキルミオン格子」と呼ぶ。

[2] 大強度陽子加速器施設（J-PARC）

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が茨城県東海村で共同運営している先端大型研究施設で、素粒子物理学、原子核物理学、物性物理学、化学、材料科学、生物学などの学術的な研究から産業分野への応用研究まで、広範囲の分野での世界最先端の研究が行われている。J-PARC 内の物質・生命科学実験施設（MLF）では、世界最高クラスの中性子およびミュオンビームを用いた研究が行われており、世界中から研究者が集まっている。物質・生命科学実験施設（MLF）の共用ビームラインの利用支援などは総合科学研究機構（CROSS）中性子科学センターが中心となっており、行っている。

[3] パルス中性子ビーム

中性子はそれ自身が磁気モーメントを持っており、物質中の磁気モーメントと相互作用して散乱される。その散乱パターンを観測することにより、物質中の磁気秩序を調べることができる。J-PARC MLF では加速した陽子ビームのパルスを標的に衝突させることでパルス状の中性子ビームを発生させ、それを実験に用いている。

[4] 過冷却

水が氷になるように、物質が温度などの外的要因によってその性質を劇的に変化させることを相転移と呼ぶ。相転移を起こす温度は決まっているが、温度変化の条件によっては本来変化が起こるべきところで変化が起こらず、その状態が低温まで残ることがある。水を例にとると 0°C を下回っても液体のままの状態で過冷却と呼ぶ。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい

理化学研究所

創発物性科学研究センター 強相関量子構造研究チーム

研究員 中島 多朗（なかじま たろう）

チームリーダー 有馬 孝尚（ありま たかひさ）

（東京大学大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻 教授）

創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ

グループディレクター 十倉 好紀（とくら よしのり）

（東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 教授）



日本原子力研究開発機構 J-PARC センター
 物質・生命科学ディビジョン 中性子利用セクション
 副主任研究員 稲村 泰弘 (いなむら やすひろ)

総合科学研究機構 中性子科学センター
 研究開発部
 副主任研究員 伊藤 崇芳 (いとう たかよし)
 副主任研究員 大石 一城 (おおいし かずき)

東京大学大学院
 工学系研究科 物理工学専攻
 准教授 賀川 史敬 (かがわ ふみたか)
 (理化学研究所 創発物性科学研究センター ユニットリーダー)
 助教 大池 広志 (おおいけ ひろし)
 (理化学研究所 創発物性科学研究センター 客員研究員)

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

J-PARC センター 広報セクション

総合科学研究機構
 中性子科学センター 利用推進部 広報担当

東京大学大学院 工学系研究科 広報室

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 総務係

※上記の[at]は@に置き換えてください。