

2024年9月24日

## 磁性体におけるスキルミオンの凝縮現象の観測に成功

— スキルミオンの凝縮が水分子の凝縮と類似することを観測した —

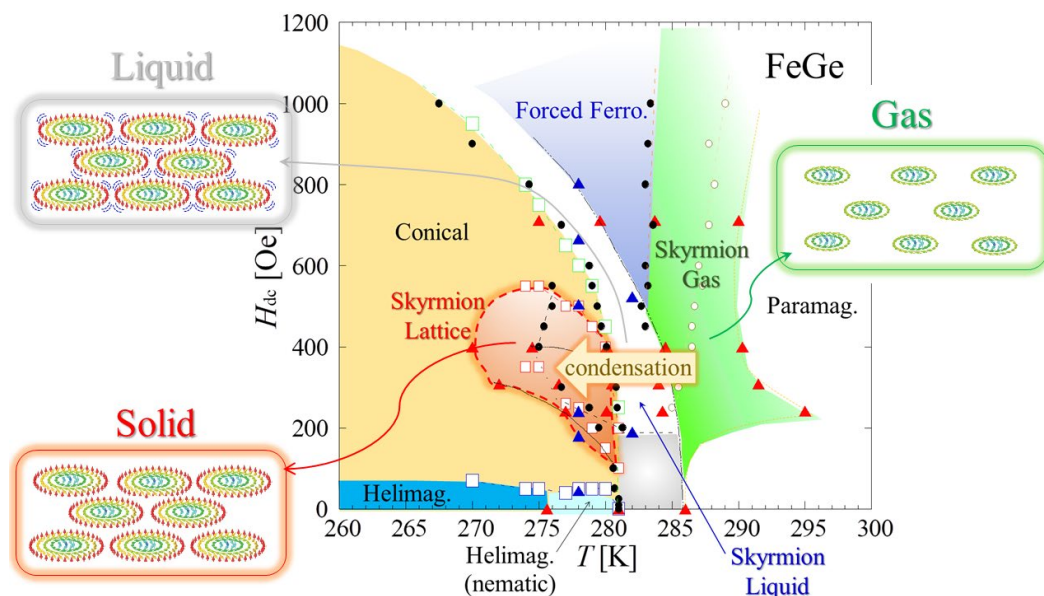
九州工業大学大学院工学研究院の美藤正樹教授が研究代表者を務める九州工業大学、広島大学、福岡大学、大阪公立大学、岡山大学の研究グループは、磁性体中に生成されるナノメートルサイズの渦型のスピン構造体（スキルミオン\*1）が、温度を下げていく過程で凝縮していくプロセスを、格子定数の温度変化を通じて観測することに成功しました。スキルミオンの数とサイズは温度や磁場によって操作でき、スキルミオンを有する磁性体は従来の強磁性磁区による磁気メモリーとは違う新しいスピンドバイスへの発展が期待されます。本研究は、スキルミオンが規則的に並んだ格子状態は、磁気秩序温度近傍で閾値以上の磁場を印加することで安定化することを再検証したという意味でも意義があり、スキルミオンを用いたスピンドバイスを設計する上での重要な物理学的知見を与えることになります。

### ポイント

- ✔ 反転対称中心\*2 を持たない結晶構造を有する磁性体において、スキルミオンの凝縮過程をはじめて系統的に追跡することに成功した。
- ✔ スキルミオンの形成に閾値となる磁場が存在することを検証した。
- ✔ スキルミオンの凝縮プロセスが水分子の凝縮プロセスと物理的に同じであることを明らかにした。

スキルミオンはその形状が特徴的なこともあり、電子顕微鏡による観察が一番直接的な物理的検出方法です。しかし、電子顕微鏡による直接観察には試料の薄膜化が必要ですが、薄膜化によって薄膜特有の異方性が発生します。バルク結晶の結晶構造に固有の異方性によるスキルミオン形成を研究しようとしたとき、次なる手段として磁気測定や中性子回折実験が有効であり、それらによってスキルミオンの固体相（スキルミオン格子）が存在することは実験的に知られていました。液体状態については、中性子回折で実験的にその存在が示唆されてきました。しかし、スキルミオン同士が孤立した気体状態から温度を下げていく過程で引力間相互作用が働き、液体状態が安定になり、最終的に斥力相互作用が働き、格子を組んだ固体状態になるという一連の過程を、温度をパラメーターに追跡した実験は過去にはありませんでした。本研究は、一種の磁歪効果を測定することで、スキルミオン形成とその凝縮過程で結晶格子がその影響を受けてわずかに歪むことを測定したものであり、実験方法自体は既存のもので新しくはありませんが、精密結晶構造解析の必要性を再検討させるものであり、実験的に新たな境地を開拓するものです。また、格子定数の変化から判明したことは、スキルミオンの凝縮プロセスが、極性を有する異方的形状を有する水分子の凝縮プロセスと同じで、スピン構造体の凝縮現象としても面白い発見です。

今回の研究成果は、スキルミオンが安定化する磁場の存在を検証し、さらにスキルミオンの凝縮プロセスを系統的に観測できた点が実験的に新しく、スキルミオンのスピンドバイスへの利用に有益な物理学的知見を与えることが期待されます。なお、本研究成果は、2024年9月23日午前7時半（米国東部標準時）に米国応用物理学会の学術誌「Journal of Applied Physics」にFeatured Article論文として掲載されました。



反転対称中心のない結晶構造を有する磁性体 FeGe における磁気相図。  
太い矢印はスキルミオンの凝縮プロセスが起こる温度磁場域を表す

## ■ 研究の内容

バルク結晶におけるスキルミオンは、反対称性の結晶構造に由来します。つまり、構造のキラリティが構造とスピンの強い相関により、スピンのキラリティに転写されることを意味します。本研究では、この逆の相関を利用しており、スピン系におけるスキルミオン形成が格子系にゆがみを与えるはずであるという考えのもと、格子定数の変化を観測することで、スキルミオンの凝縮プロセスの検証を目指しました。この研究は、スキルミオン形成とその凝縮によって上昇する潜在的エネルギーが格子系に拡散していることも示唆しています。スキルミオン凝縮における格子定数の変化は非常に小さく、高エネルギー加速器研究機構での放射光を利用した X 線回折実験で上記の現象を検証しました。まず、スキルミオンを出現させるにはある臨界値以上の磁場が必要であることを再検証しました。そして、格子定数の減少（格子収縮）と上昇（格子膨張）の観測から、スキルミオン間の相互作用が引力的か斥力的かを知ることができ、スキルミオンの凝縮過程が、水分子の凝縮と似通っていることを明らかにしました。電子の自転による磁石の種であるスピンの渦状に集まったナノメートルサイズのスピнта風が集まって、最終的に周期的に並ぶプロセス、つまりスピン集合体の凝縮過程を、水分子の凝縮と関連付けて理解することが出来たことは、スキルミオンの物理的理解を推進し、理論家に重要な実験的示唆を与えることになるはずです。

## ■ 今後の展開

本研究は複数のスピンの構築するオブジェクトを一つの仮想粒子と捉えて、それが生まれるにはある程度以上の磁場が必要であることを実験的に確かめただけでなく、それがどのような相互作用を感じて、孤立していた状態から、相互作用をし始め、最終的に格子を汲んだ固体状態に変遷するかという一蹴の凝縮現象を実験的に追跡することに成功しました。現在、多方面で、このオブジェクトをデバイスとしていかに利用していくか、という研究が進んでおり、それらの応用研究に今回得られた知見をどのように反映させていくかが課題です。

- \*1 スキルミオン： 複数のスピンの構築する渦上のオブジェクト。
- \*2 反転対称中心： 空間座標の全ての成分に対して、それらの符号を変えた成分の座標に移る対称性が存在するときの対称中心。

## ■ 論文の詳細情報

タイトル： Magnetostriction Related to Skyrmion-Lattice Formation in Chiral Magnet FeGe  
著者名： Masaki Mito, Takayuki Tajiri, Yusuke Kousaka, Marina Miyagawa, Tamami Koyama,  
Jun Akimitsu, and Katsuya Inoue  
雑誌： Journal of Applied Physics  
DOI： 10.1063/5.0227382

※ 本研究は JSPS 研究拠点形成事業(Core-to-Core) A. 先端拠点形成型「スピンのキラリティを軸にした先端材料コンソーシアム」(広島大学)の助成を受けたものです。

**【研究内容に関するお問い合わせ】**

九州工業大学 大学院工学研究院 教授 美藤 正樹

電話:093-884-3286 Mail:mitoh@mns.kyutech.ac.jp

広島大学 大学院先進理工系科学研究科 教授 井上 克也

電話:082-424-7416 Mail:kxi@hiroshima-u.ac.jp

福岡大学 理学部 物理科学科 助教 田尻 恭之

電話:092-871-6631Mail:tajiri@fukuoka-u.ac.jp

大阪公立大学 大学院工学研究科 准教授 高阪 勇輔

電話:072-254-7296 Mail:koyu@omu.ac.jp

**【報道に関するお問い合わせ】**

九州工業大学 経営戦略室(広報・ブランディング担当)

電話:093-884-3007 Mail:pr-kouhou@jimu.kyutech.ac.jp

広島大学 広報室

電話:082-424-3749 Mail:koho@office.hiroshima-u.ac.jp

福岡大学 広報課

電話:092-871-6631 Mail:fupr@adm.fukuoka-u.ac.jp

大阪公立大学 広報課

電話:06-6605-3411 Mail:koho-list@ml.omu.ac.jp