

マグノンの運ぶスピンと熱の流れに現れる流体力学的な兆候を予言

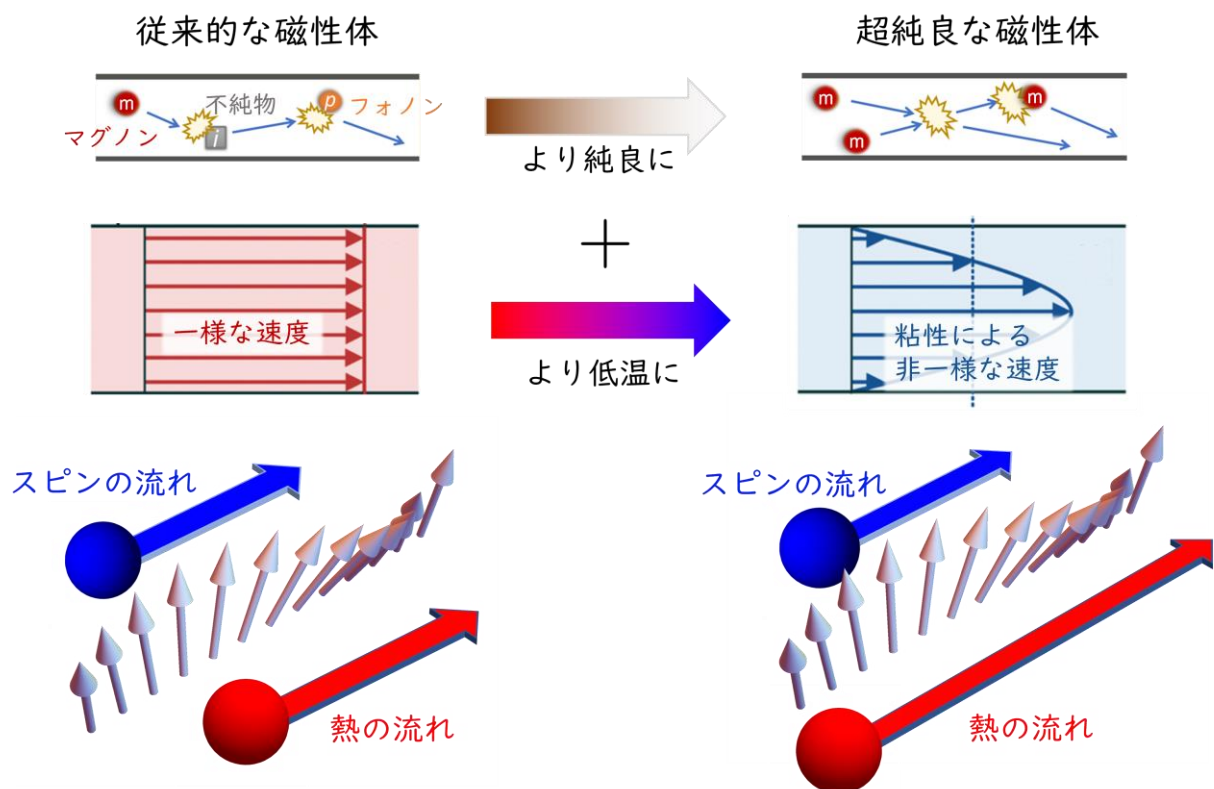
—マグノン流体実現およびスピントロニクス応用へ期待—

概要

京都大学大学院理学研究科 佐野涼太郎 博士課程学生（日本学術振興会特別研究員）および中国科学院大学カブリ理論科学研究所 松尾衛 准教授らの研究グループは、磁性体中のマグノン^{注1}が流体力学的に振る舞う場合に、マグノンが運ぶスピンと熱の流れの比が従来のものから大きく外れることを理論的に予言しました。

近年、次世代コンピューティングや情報処理技術の新たな候補として、従来のデバイスで利用される電子に代わり、磁性体中のマグノンが情報媒体として検討されつつあります。特に最近実現できるようになった純良な磁性体ではその輸送特性が大きく変わり、流体力学的な兆候が表れることが予想されています。ところが、そのようなマグノン流体の実験的実証に関する研究はほとんどなされてきませんでした。そこで本研究では、マグノンが運ぶスピンと熱の流れの緩和プロセスの違いに着目することにより、マグノン流体検出への重要な指針を与えることに成功しました。さらに本研究成果により、スピンと熱の絡み合いを調べる研究分野であるスピントロニクスが大きく前進することが期待されます。

本成果は、2023年4月21日に米国の国際学術誌「*Physical Review Letters*」にオンライン掲載されました。



1. 背景

電子は日常生活でよく目にする電気的な性質のみならず、「スピン」と呼ばれる電子の自転運動に由来する磁気的な性質も兼ね備えています。スピントロニクスと呼ばれる分野は、これら2つの性質を巧みに利用することにより、スピンの輸送現象^{注2)}を中心にこれまで情報社会に大きく貢献してきました。

最近では、スピンを運ぶ情報媒体として電子に代わって、新たに磁性体中のマグノンが大きな注目を集めています。電子とは異なり、マグノンは電気的な性質を持たないため、スピンを運ぶ際にジュール熱^{注3)}が発生しないことが大きな特長です。これはデバイス応用の際に大量集積化の可能性を秘めていることを意味します。

一方で近年における実験技術の著しい躍進により、量子力学的な輸送現象の研究はますます加速しつつあります。特に、結晶成長技術の進展によって作製できるようになった超純良な結晶では、輸送現象に粘性効果をはじめとした流体力学的な兆候が現れることが報告され始めています。固体中で実現する流体力学の顕著な例としては金属中における流体力学的な電気の輸送が挙げられ、「電子流体力学」と呼ばれる新たな潮流を生み出してきました。

電子流体における主役は金属中の電子ですが、それを磁性体中のマグノンに置き換えた「マグノン流体力学」を構築しようという機運もまた高まっています。輸送現象の研究においては、マグノンがどの粒子と衝突するのかという散乱過程に着目することが重要です。従来の磁性体では、マグノンと不純物やフォノン^{注4)}との散乱が支配的であり、磁性体中でのマグノンの速度は一様になります(図左)。ところが、超純良な磁性体というごく限られた条件下では、マグノン同士の散乱が支配的になり、粘性効果に代表される流体力学的な兆候が現れる可能性があります(図右)。特にマグノンはジュール熱を伴わないスピンの担い手として注目されており、流体力学的なマグノン輸送はこれまでにない革新的な機能性を秘めていると期待されます。このようなマグノン流体の研究をより前進させるためには、まず磁性体中でマグノン流体が実現しているかどうかを確認する必要があります。しかしながら現時点では、マグノン流体の実験的検証に関する研究はほとんどなされてきませんでした。

2. 研究手法・成果

そこで本研究では、マグノン流体の実験的検証およびそのスピントロニクス応用へ向けた第一歩として、マグノンが従うべき流体力学方程式を導出するとともに、マグノンが運ぶスピンと熱の流れを考察しました。特にマグノンが流体力学的に振る舞う場合には、本来成立するはずのスピンの流れの比が一定であるという法則が大きく破れることを理論的に明らかにしました。これは、支配的であるマグノン同士の散乱において、スピンと熱の流れの緩和プロセスが異なることに起因すると結論付けられます。

3. 波及効果、今後の予定

本研究成果は、マグノンの流体的な振る舞いが実現していることを示唆する重要な証拠となるのみならず、マグノン流体実証へ向けた重要な指針となることが期待されます。さらに、スピンと熱の相互変換を調べる分野であるスピнкаロリトロニクスに対しても新たな知見を与え、当該分野を大きく推し進めることもまた期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業・特別研究員奨励費(JP22J20221)、同・基盤研究(B)(JP20H01863)および同・基盤研究(A)(JP21H04565)の支援を受けて行われました。

<用語解説>

- 注1) **マグノン**：磁性体内部で整列したスピンの揺らぎを量子力学的に取り扱い、粒子として捉えたもの。
- 注2) **輸送現象**：物体中を電気や熱などの物理量が流れる現象の一般的な呼称。
- 注3) **ジュール熱**：金属や半導体など電気抵抗を持つ物質に電流を流した際に発生する熱。これにより無駄なエネルギーを消費してしまう。また発生した熱は適切に放熱することが求められる。
- 注4) **フォノン**：結晶内部の音波を量子力学的に取り扱い、粒子として捉えたもの。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Breaking down the magnonic Wiedemann-Franz law in the hydrodynamic regime
(マグノン流体における Wiedemann-Franz 則の破れ)

著者：Ryotaro Sano and Mamoru Matsuo

掲載誌：*Physical Review Letters* DOI：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.166201>