

磁性体の非平衡定常状態におけるマグノンケミカルポテンシャル発現機構

[1] 要旨

磁性体の低エネルギー励起を記述するマグノンの非平衡定常状態でのケミカルポテンシャルを、2種類の磁場によるパラレルパンピングの手法を使うことで、有限にできることが知られていた。しかし、その発現機構が理論的に未解明であった。最近、フェリ磁性体のパラレルパンピングに関する新しい理論による研究が行われ、その発現機構が解明された。その研究を発展させることで、磁性体のマグノンの非平衡物理現象のより深い理解や磁気構造の違いを利用する応用への展開につながることを期待できる。

[2] 本文

マグノンは、磁性体の低エネルギー励起を記述する準粒子である。磁性体では、磁気転移温度以下の温度で、固体中の各格子点上の磁気モーメント（磁石の構成要素）がある方向に自発的に揃うことにより磁気構造が生じる。その磁気モーメントのゆらぎが磁性体の低エネルギー励起に対応し、それはマグノンの生成・消滅演算子を使って記述される。

マグノンは Bose 統計に従う準粒子なので、通常の Bose 粒子と同様、マグノンも Bose-Einstein 凝縮 (BEC) する可能性がある。BEC は Bose 統計の帰結なので、マグノンでも可能である。実際、フェリ磁性絶縁体のイットリウム鉄ガーネット (YIG) において、パラレルパンピングを使ってマグノンケミカルポテンシャルを有限にすると、マグノン BEC を実現できることが実験的に提案された。ここで、マグノンケミカルポテンシャルを有限にする必要があるのは、マグノンバンドの最低エネルギーが有限になることがあり、その最低エネルギーとマグノンケミカルポテンシャルの差をゼロにすることが BEC の実現に必要なからである。

上記の YIG の実験を契機として磁性体のマグノン BEC に関する様々な研究が活発に行われたが、パラレルパンピングを使ってマグノンケミカルポテンシャルを有限にする機構が理論的に未解明であった。パラレルパンピングでは、2種類の平行な磁場（時間依存しない磁場と時間依存する磁場）を磁性体に印加する（図 1）。その手法を使うと、非平衡定常状態でマグノンケミカルポテンシャルを有限にできることが実験的に示されている。しかし、パラレルパンピングの従来の理論では、時間依存する磁場のハミルトニアンがマグノンの数の保存則を破るため、マグノンケミカルポテンシャルはゼロになる。この実験と理論の不一致は、マグノンケミカルポテンシャルの発現に重要な役割を果たす「何か」が従来の理論で見落とされていることを示唆していた。

最近、東邦大学理学部の荒川直也氏は、フェリ磁性絶縁体のパラレルパンピングの新しい理論を構築し、その非平衡定常状態のマグノンの分布関数について調べ、有限なマグノンケミカルポテンシャルの発現機構を明らかにした。その成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of Physical Society of Japan* の 2019 年 8 月号に掲載された。

その新しい理論では、時間依存する磁場を量子論的に扱い、量子化した磁場を記述するフォトンがマグノンに与える影響を熱浴として扱っている。フォトン熱浴として扱うため、時間依存する磁場のハミルトニアンがマグノンの状態に与える影響を、フォトンの自由度をくりこんで、マグノンの状態間の遷移確率として記述できる。そのような取り扱いは、時間依存する磁場を古典的に扱う、従来の理論とは本質的に異なる。

上記の新しい理論を使った解析の結果、時間依存する磁場のハミルトニアンによるマグノンペアの生成の遷移確率とその逆過程の遷移確率が定常状態で満たす詳細釣り合いのため、パラレルポンピングの平衡定常状態におけるマグノンの分布が有限のマグノンケミカルポテンシャルをもつ Bose 分布関数で記述できることが示された。この結果は、YIG のパラレルポンピングでマグノンケミカルポテンシャルを有限にできることを示した実験結果を定性的に説明できる。

本研究は、磁性体のマグノンの非平衡物理現象のより深い理解や磁気構造の違いを利用する応用への発展につながる研究である。まず、本研究では非平衡定常状態のみを扱っているため、それを発展させて非定常状態の解析を行うことにより、磁性体のマグノンがどのように緩和するのかを明らかにできる。そのような緩和現象の理解は、磁性体のマグノンを利用する輸送現象などの非平衡物理現象のさらなる理解につながる。また、本研究の理論を反強磁性体などの他の磁性体に拡張した解析をすることにより、磁性体の磁気構造の違いに由来する物性も明らかにできる。そのような理解は、異なる磁気構造をもつ磁性体の個性を最大限に利用した物性の発見やその応用につながると期待できる。

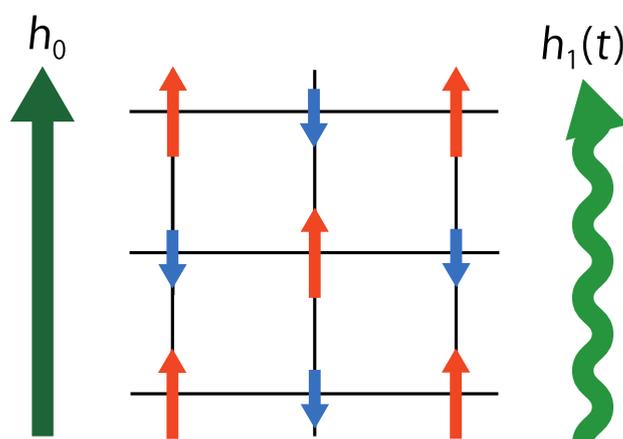


図1. パラレルポンピングでは、時間依存しない磁場（緑の矢印）と時間依存する磁場（緑の波線矢印）を印加する。フェリ磁性体では、赤と青の矢印のように、各格子点の磁気モーメントは大きさと向きが異なる。

原論文

[Mechanism for a Chemical Potential of Nonequilibrium Magnons in Parametric Parallel Pumping](#)

N. Arakawa, J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 084704 (2019).

<情報提供：荒川直也（東邦大学理学部）>