

# 強磁性体と反強磁性体におけるカイラルフォノンのマグノンへの変換

## [1] 要旨

カイラルフォノンは、結晶中の原子による微視的な回転運動に対応し、角運動量を持つ。先行研究でフォノンの持つ角運動量が電子のスピンや電荷へ変換され、スピン磁化や電流が誘起されることが示されている。本研究では、これを磁性体へ拡張し、強磁性体や反強磁性体におけるカイラルフォノンからマグノン励起への変換現象を断熱近似に基づいたモデル計算で調べている。その結果、カイラルフォノンによる幾何的な効果によってマグノン数が増えたり、減ったりすることを明らかにした。

## [2] 本文

電子スピンと力学的な回転とを結びつけるスピン回転結合の提案に関連して、カイラルフォノンや表面弾性波といった物質の回転運動に伴う様々な新奇物性が注目されている。特に最近、カイラルフォノンに関する研究が盛んになっており、磁性やスピントロニクスなどの分野で注目されている。結晶中の各原子の微視的回転を伴うフォノンがカイラルフォノンと呼ばれ、その回転運動によるフォノン角運動量が理論的に定式化された。フォノン角運動量と電子の相互変換については近年よく指摘されており、特に原子の質量は電子と比べると十分重いため、原子の回転は電子の運動より十分遅いと考えられ、断熱近似の条件が満たされる。それに基づき先行研究では、カイラルフォノンによってスピン磁化や電流が誘起されることが報告された。結晶中の各原子がそれぞれの平衡位置の周りを周期的に回ると、原子間距離が時間とともに変化し、そして電子系におけるホッピングパラメーターやスピン軌道相互作用がカイラルフォノンによって変調される。このようなプロセスを考えると、カイラルフォノンと電子の相互変換を理論計算で示すことができる。

最近、東京工業大学理学院物理学系の姚大鵬氏と村上修一氏は、磁性体におけるカイラルフォノンがマグノンに与える影響の研究を行った。すなわち、原子の微視的な回転運動により、原子間距離が周期的に変化し、スピン間の相互作用が変調される時に、マグノン励起状態がどのような影響を受けるかに関して、断熱近似に基づいたベリー位相の方法を用いて、カイラルフォノンによるマグノン励起の変化を強磁性体と反強磁性体において計算し、カイラルフォノンがマグノンへ変換する現象を初めて理論的に予言した。この成果は JPSJ の 2024 年 3 月号に掲載された。

具体的な研究対象は、2次元のカゴメ格子における強磁性マグノンおよびハニカム格子における反強磁性マグノンであり、これらはスピン間交換相互作用とジャロシンスキー守谷相互作用を含んだスピンモデルである。それぞれの格子上でカイラルフォノンモードを導入すると、マグノン励起状態はカイラルフォノンによって変調され、図1に示したように、フォノンの回転の向きに依存して、マグノン数が増えたり、減ったりすることを指摘した。ここでは断熱条件を満たす低いフォノン周波数領域に注目して、ベリー位相の方法を用いて幾何的な効果によるマグノン励起を調べている。その結果、カイラルフォノンによりマグノン数が増えるためには、スピンの量子化軸周りの回転対称性の破れ、すなわち、異方的なスピン間相互作用が必要なことが明らかにされた。本研究が予言した現象を通じて、フォノンカイラリティという性質がマグノン数の変化、すなわち一様磁化の変化をもたらす、カイラルフォノンが有効的な磁場とみなされることが磁性体でも結論づけられる。こうした理論提案は、例えば、パイロクロア格子上の強磁性体  $\text{Lu}_2\text{V}_2\text{O}_7$  や層状反強磁性体

MPS<sub>3</sub>(M=Mn, Fe, Ni etc.)に応用できる, これらは, それぞれ2次元のカゴメ格子とハニカム格子を含み, 磁性原子スピ間に交換相互作用とジャロシンスキー守谷相互作用が働いているため, 本理論を直接応用できると期待できる.

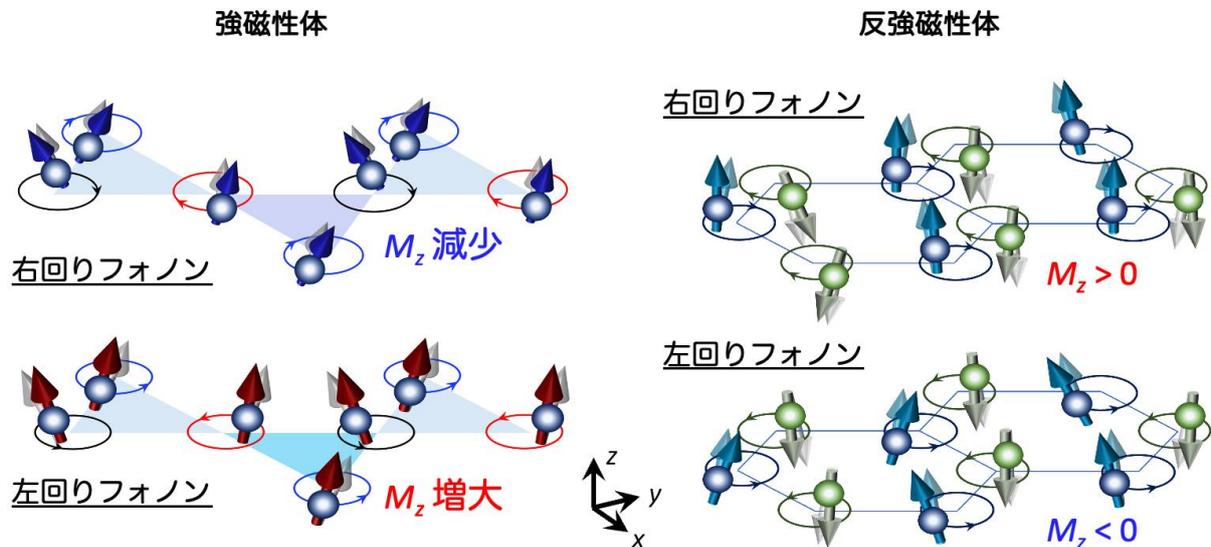


図1. カイラルフォノンのマグノンへの変換の様式図. 左は強磁性体, 右は反強磁性である.

なお, 本研究では強磁性体と反強磁性体の両方が扱われているが, この現象を実験的に観測しようとする, 強磁性体の場合は, 既に自発磁化を持っているため, カイラルフォノンによるスピンの磁化の変化分と区別するのは難しい. 一方, 反強磁性体の場合は, 正味の磁化を持たないため, カイラルフォノンに誘起された磁化の測定がより容易であると考えられ, カイラルフォノンのマグノンへの変換現象の反強磁性体での観測が期待されている.

原論文 (2024年2月28日公開済)

**Conversion of Chiral Phonons into Magnons in Ferromagnets and Antiferromagnets**

D.Yao and S.Murakami, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 034708 (2024).

<情報提供: 姚大鵬 (東京工業大学理学院物理学系)  
村上修一 (東京工業大学理学院物理学系) >