ナノ構造磁性体中の輻射場とマグノン励起の空間的な相関に起因するマグノン流と光学応答

横　山　知　大*

Magnon Current and Optical Response Due to a Spatial Correlation between the Radiative Field and Magnon Excitation in Magnetic Nanostructures

Tomohiro YOKOYAMA*

Spin wave is a collective excitation of magnetization. Its quantum is called magnon. The magnon carries a quantized spin angular momentum, hence the radiative field is coupled with the magnon strongly when the field is spatially designed. In this study, we reveal an enhanced and functionalized magnon current and a peculiar level attraction-like spectrum on the optical reflection based on a spatial design of radiative field by the dielectric constant of nanostructures, the spatial correlation between the radiative field and the magnon, and the magnon-magnon interaction. These results contribute to an emergence of structure-induced cross-correlation between the magnetic and electric fields, exciton (polarization), and magnon (magnetization).

1. 研究背景

強磁性体やフェリ磁性体中では、原子周りに局在した電子スピンの向きがそろうことで巨視的な磁化を持つ。この局在スピンが歳差運動を起こし、交換相互作用や磁気双極子相互作用を介してその歳差運動が伝播していく現象をスピン波、その量子をマグノンと呼ぶ。マグノンはスピンが協力して素励起として振る舞う集団励起である。マグノンは角運動量を持ち、その伝搬は電流を伴わないスピン流となるため、エネルギー消費を抑えた情報転送手段として注目されている。

本研究では、磁性体をマイクロ・ナノ構造にすることで磁性体内部の輻射場をデザインし、マグノン波動関数と輻射場（マイクロ波）の空間的な相関による結合増強と、その際のマグノン流の増大や光学応答を議論した[1,2]。マグノンと電磁波が結合した準粒子状態をマグノン-ポラリトン(MP)という。最近の研究では、室温でのMPも報告されており[3]、室温での量子デバイス素子としても注目を集めている。本研究では、磁性体におけるスピン励起に加え、磁性体が持つ背景誘電率による電磁波の反射や波数変調が重要となる。マイクロ・ナノ構造中の誘電率の空間構造と輻射場の電場成分、輻射場の空間構造とマグノン波動関数の空間的相関、磁気双極子相互作用（磁場の縦場成分）によるマグノン間の結合、の3者の共創によるMPの機能化[1]や特異な反射率スペクトル[2]が得られた。

2. 積層構造における磁気アンテナ効果とマグノン流の増大[1]

薄い磁性体において電磁波とマグノンの結合は弱く、MPは形成されない。磁性体をミリメートルスケールで厚くすると、結合が増強されてMPが形成されるが、そのマグノン流制御に向けた回路作製としては好ましくない。我々は図1(a)に示す厚い磁性体と薄い磁性体の積層構造を考えることで、回路作成が可能な磁性体構造における複合MP形成による磁気アンテナ効果とマグノン流の増大と機能化を提案した。

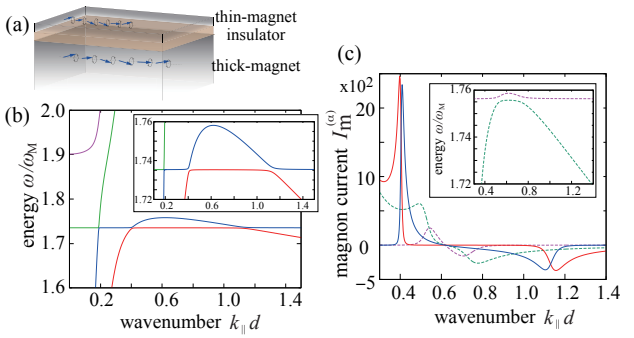

図1　磁性体の層構造における磁気アンテナ効果.

積層構造の２つの磁性体におけるマグノンは磁気双極子相互作用によって結合する。そのため、厚い磁性体におけるMP形成に起因した分散関係や負の群速度などの機能性が磁気アンテナ効果によって薄い磁性体のマグノンに転写された複合MPとなる。複合MPの分散関係とマグノン流を図1(b)、(c)に示す。薄い磁性体のマグノンに起因する平坦な分散が複合

2022年3月5日 受理
* 豊田理研スカラー
大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻

MP形成によって正負の群速度を示し、入射マイクロ波の波数（入射角度）制御によってマグノン流のスイッチングが可能となる。図1(b)の青線頂上付近では、厚い磁性体中のMPは遅いため、マグノン流は流れない。印加磁場を適切に制御し、そのMPと薄い磁性体のマグノンによる複合MPを形成することで（図1(c)の破線）、薄い磁性体のエッチングによる回路化が期待される。

3. 反射率スペクトルに現れる特異な交差 [2]

一方、MP励起に起因した光学応答として反射率のスペクトルに着目する。厚い磁性体に印加する外部磁場を制御すると、背景誘電率による輻射場のキャビティモードとのMP形成に起因した反射率スペクトルが得られる。図2(a)、(b)にそのスペクトルを示す。磁性体の厚さに対応したマグノンモードによる反射率が１のストップバンドが外部磁場によって高エネルギー側にシフトし、キャビティモードによるディップ構造がストップバンドに沿う様にシフトする。１つのマグノンモードのみが寄与する場合（図2(a)）、キャビティモードとマグノンモードの交差付近でlevel attractionに類似したスペクトルが現れた（図2(b)）。Level attractionは散逸のある非エルミート系で得られ、エネルギー準位の交差近傍で準位の実部が縮退し、反交差の分散を90度回転させたようなスペクトルを示す。MPの先行研究においても非エルミート系の議論が進められている[4]。しかし、我々の理論では輻射場が結合した系のモードからはlevel attractionの振る舞いはなく、理論的に進展する非エルミート系の議論と実験の測定量との間に慎重な検討が必要である。我々のlevel attraction様なスペクトルは、図2(c)に示すように、超格子構造に薄い磁性体を挿入した系においても系統的に得られる。マグノンモードの偶奇に応じてlevel repulsionとattractionとなり、エネルギー散逸よりも波動関数のパリティに応じた位相シフトが本質であることを示唆する。

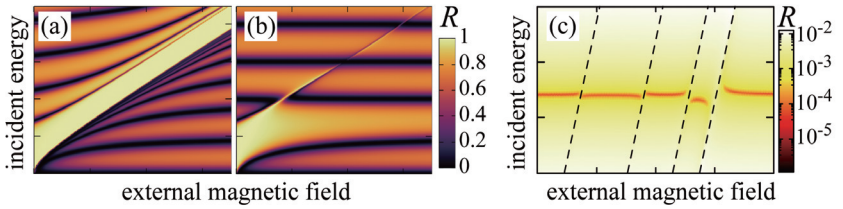

図２　マグノン-ポラリトン形成による反射スペクトル.

4. プラズモンと個別励起のコヒーレント結合の理論 [5]

スピンの集団励起だけではなく、電子の集団励起であるプラズモンにおける、電磁波を介した個別励起と集団励起のコヒーレント結合の理論を構築した。集団励起は、電子-正孔対の低エネルギー・連続的な多数の個別励起がクーロン相互作用（電場の縦場成分）によって互いに結合することで、高エネルギーに現れる離散的な励起である。ナノ構造中ではその境界条件によって、個別励起とプラズモンの集団励起の区別がなくなっていくが、その際に横場（電磁場）を介してコヒーレントに結合できる。この結合成分はナノ構造形状による個別励起の電子-正孔対の波動関数と、金属などの大きな背景誘電率によって変調された輻射場が空間相関を持つことで増大される。我々は横場成分によって集団励起がシフトし、また、結合によるエネルギー転送を増大させえる輻射幅の増加を示した。

5. まとめ

本年度の研究で、マグノンと輻射場の空間的相関、ナノ構造の背景誘電率による輻射場のデザイン、マグノン間の磁気双極子相互作用などが協奏的にはたらくことで、MPの機能化や特異的な光学応答が現れ得ることを明らかにした。また、現在は球状磁性体におけるMP励起による異方的電磁場散乱や電場や磁場の交差相関が現れる土台としてのマグノンによる非線形光学応答の定式化、シミュレーションの実装を進めている。複合MPによるマグノン流とその回路化提案に向けた研究では、シミュレーションによるfeasibilityの検証が必要である。ナノ構造における電子波動関数やマグノンの境界条件を外部電場で制御することで、電場・磁場・励起子・マグノンの交差相関にアプローチしていく。

REFERENCES

1) K. Kato, T. Yokoyama and H. Ishihara, arXiv: 2110.08147.
2) K. Kato, T. Yokoyama and H. Ishihara, *in preparation*.
3) X. Zhang, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **113** (2014) 156401.
4) M. Harder, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **121** (2018) 137203；B. Yao, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **100** (2019) 214426.
5) T. Yokoyama, M. Iio, T. Kinoshita, T. Inaoka and H. Ishihara, *Phys. Rev. B*, **105** (2022) 165408.