

## 共振器オプトマグノニクス——実験を中心に



長田 有登

東京大学大学院総合文化研究科  
先進科学研究機構  
alto@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

合わせ鏡の中では多重反射した像が鏡の奥の方にずらりと並んで見え、その空間がまるで広がったように見えるものだ。合わせ鏡に「閉じ込められた」光と、同じくその中に捕らわれた物体は普段よりも多い回数出会うことになり、より強く相互作用するようになるとも考えられる。実はこれを半導体素子の端面と半導体中の電子で実装すると、こんなにちよく使われる半導体レーザーの実現に繋がる。

光共振器によってその中の物質と光の相互作用を増強するというアイデアは非常に有用だ。これにより単一の原子と単一の光子がそれぞれ緩和するよりも速く量子的な情報をやり取りすることも可能になり、共振器量子電気力学という分野が花開いた。また、共振器オプトメカニクスでは、ほぼ透明な薄膜に対する光の輻射圧が、光共振器によって薄膜の振動状態を制御することができるほどに増強される。

本稿の主題となる光と磁気の相互作用についてはどうだろうか。光と磁気に関する研究は Faraday による磁気光学効果の発見 (Pockels 効果の発見よりも 50 年早い) に端を発し、近年ではスピントロニクスの技術としての光によるマグノン (スピン波) の生成と検出、そして量子技術でのマイクロ波-光量子変換といった応用に向けてマグノンの光制御が精力的に研究されてきた。しかし、光と磁気の相互作用は非常に弱くことが知られている。これもまた光共振器で増強しよう、というモチベーションで共振器オプトマグノニクスが勃興した。

共振器オプトマグノニクス、つまり光共振モードとマグノンの相互作用の研究には、マグノンの寿命が長く波長  $1.5 \mu\text{m}$  の光に

対して透明でもあるイットリウム鉄ガーネット (YIG,  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ) の利用が適している。ただし、レーザーの研究でよくやられるように YIG 結晶に反射防止コートを実施して Fabry-Perot 共振器内に配置する、あるいは YIG 結晶に高反射コートを実施して Fabry-Perot 共振器とするのではなく、YIG の球がもつウィスパーリングギャラリーモード (WGM) が利用された。WGM とは、誘電体球の内部を光が全反射しながら周回するような共振モードであり、偏光 (スピン) だけでなく軌道角運動量の自由度ももつような興味深いモードである。

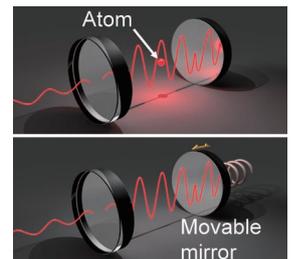
はじめは共振器オプトメカニクスと同様、共振器内の光子のマグノンによる非弾性散乱 (Brillouin 散乱) が単に増強されるものと思われていた。しかし上記の WGM を用いることによりマグノンによる Brillouin 散乱の非相反性、Stokes/anti-Stokes 散乱の非対称性といった興味深い性質の発現が実験により明らかになった。そのうえ、光とマグノンのスピンおよび軌道角運動量の授受や WGM 光のスピン軌道結合の顕わな影響といった豊かな物理を内包することが明らかになったのである。

こういった実験結果に触発されるように共振器光による高速磁化反転や波数選択性・光による効率のよいスピン波生成の理論提案、そして微細加工技術を駆使した共振器オプトマグノニクスの実験研究などの新たな展開をみせている。このように、共振器オプトマグノニクスは光と磁気の研究に新たな舞台を提供し、いまなおスピントロニクスと量子エレクトロニクスの両面から、実験的にも理論的にもその応用が精力的に研究されている。

## ——用語解説——

## 共振器量子電気力学・共振器オプトメカニクス:

前者は共振器と二準位系の結合系 (下図の上)。後者は光共振器に機械振動子が組み込まれ、その変位が共振器長を変化させるような系 (下図の下)。(大抵の場合) 前者は Jaynes-Cummings 相互作用、後者は光の輻射圧が基本的な相互作用だが、どちらも共振器による光-物質相互作用の増強の恩恵を受けている。



## スピン波・マグノン:

磁気秩序のある物質において生じるスピン集団の「さざ波」。準粒子化したものをマグノンという。



## Brillouin 散乱:

フォノンやマグノンによる電磁波の非弾性散乱。

## 非相反性:

本稿では時間反転対称性が破れていることに起因し、WGM の時計回りと反時計回りで Brillouin 散乱が異なる振る舞いを示すことを指す。

## Stokes/anti-Stokes 散乱:

エネルギーが減少/増大する電磁波の非弾性散乱。