

熱平衡な光，非平衡な磁性体

馬場 基 彰 (横浜国立大学大学院工学研究院/京都大学大学院理学研究科/京都大学白眉センター bamba.motoaki.y13@kyoto-u.jp)

光（電磁波）は非平衡，磁性体は熱平衡が主な研究の舞台である。ここでは逆に，横場の電磁場を熱平衡下で相転移させるために，磁性体中のマグノンの非平衡下での振る舞いを測定したという話をする。

1973年，光場（横場の電磁場）を介した原子間の相互作用によって，原子集団が横場の電磁場と一緒に相転移すると理論的に提唱された。これは超放射相転移やディッケ（Dicke）相転移とよばれる。その実現によって，非常に強い2モード量子スクイーミングが熱平衡下で得られる。デコヒーレンスに対して堅牢な量子科学技術の基盤に繋がりうる現象である。しかし，熱平衡下の超放射相転移は，提唱より50年，いまだ観測された例がない。

超放射相転移は，荷電粒子が電気双極子遷移を通じて電磁場と相互作用する単純な系ではまず起こらないと認識されており，スピンなどの別の自由度の存在が肝心となる。この戦略に基づき，最初の一步として，我々は**スピン波（マグノン）**版の超放射相転移を確認した。具体的には，磁性体 ErFeO_3 中の Fe^{3+} スピン格子のマグノンを介して， Er^{3+} スピン同士が相互作用することで， Fe^{3+} マグノンと Er^{3+} スピン集団が約4 Kで相転移することを確認した。

マグノン版の超放射相転移かどうかを検証するためには，熱平衡下の相図だけでは不十分である。我々は， Fe^{3+} マグノンを介して Er^{3+} スピン同士が確かに相互作用することを確認するために， ErFeO_3 の静磁場下でのテラヘルツ分光実験を実施した。吸収スペクトルに Fe^{3+} マグノンと Er^{3+} 遷移のピークが得られ，静磁場の大きさの変化により，それらの準位反発（反交差； anticrossing）が観測された。さらに我々は Er^{3+} を Y^{3+} に置換して Er^{3+} 密度 N/V （原子数 N ，体積 V ）を変化させることで，その準位反発の大きさが Er^{3+} 密度の平方根 $\sqrt{N/V}$ に比例することを確認した。 Fe^{3+} と Er^{3+}

が近接的に相互作用するだけなら，準位反発は N/V に比例するはずである。観測された $\sqrt{N/V}$ 依存性が， Fe^{3+} マグノンを介して Er^{3+} スピン同士が相互作用することの証拠である。

\sqrt{N} に比例する準位反発は，真空ラビ（Rabi）分裂とよばれる（ V は一定とすることが多い）。初期状態として Er^{3+} スピンのどれか1個だけが励起した状態を考える。それが基底状態に緩和した際， Fe^{3+} マグノン（超放射相転移が提唱された本来のモデルでは共振器中の光子）が1個生成される。そのマグノン（光子）はまた Er^{3+} スピン（原子）集団のどれか1個を励起する。これが繰り返されることで，マグノン数（光子数）の期待値は時間的に振動し，マグノン（光場）の振動にはうなりが生じる。これが真空ラビ（Rabi）振動とよばれる。また，うなりをフーリエ変換するとスペクトル上に準位反発が得られ，これが真空ラビ分裂とよばれる。初期状態でマグノン（光子）がゼロ個でも起こる振動であることから「真空」と冠せられる。マグノン（光子）1個によって Er^{3+} スピン（原子）のどれか1個が励起されればよいことから，真空ラビ振動の周期は \sqrt{N} に反比例し，真空ラビ分裂の大きさは \sqrt{N} に比例する。

このように， ErFeO_3 中の Fe^{3+} マグノンと Er^{3+} 遷移の非平衡ダイナミクス（吸収スペクトル）の測定から， Fe^{3+} マグノンを介した Er^{3+} の協同的な相互作用を確認した。また，準位反発の大きさから相互作用の強さを見積もることで， ErFeO_3 が約4 Kで示す相転移が，確かにマグノン版の超放射相転移であると結論づけた。

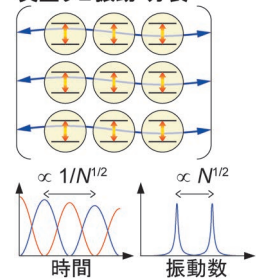
現在，より確かな証拠を得るために， Fe^{3+} マグノンと Er^{3+} スピン集団の熱平衡下での量子スクイーミング観測を目指して研究を進めている。デコヒーレンスに対して堅牢な量子科学技術を構築するためにも，まずは観測が必要である。

用語解説

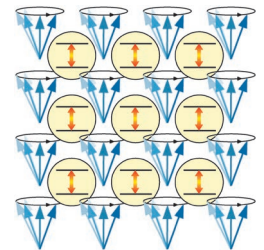
スピン波（マグノン）：

スピン歳差運動が波として物質中を伝搬するものがスピン波，スピン波を量子化したものがマグノンとよばれる（電磁波を量子化したものが光子）。

真空ラビ振動・分裂



N 個の原子が光場（横場の電磁場）を介して協同的に相互作用する時，真空ラビ振動の周期は \sqrt{N} に反比例し，真空ラビ分裂の分裂幅は \sqrt{N} に比例する。



原子集団がスピン波と協同的に相互作用すれば，それらの間で振幅がキャッチボールされ（ラビ振動し），スペクトル上には真空ラビ分裂が現れる。