

熱平衡下の量子制御に向けた光と物質の超強結合

Ultrastrong Light-Matter Coupling to Control Quantum States in Thermal Equilibrium

京大理/白眉¹ ○馬場 基彰¹

Kyoto Univ.¹, °Motoaki Bamba¹

E-mail: bamba.motoaki.y13@kyoto-u.jp

光や物質の量子論的な状態（量子状態）の制御（量子制御）や機能化は、例えばレーザー光を物質に照射するなど、注目する系と外界との間にエネルギーの流れがある非平衡下において基本的に研究されてきた。その際、量子状態は系の励起状態であるため、デコヒーレンスやエネルギー散逸によって量子状態は壊されてしまう。では、系の基底状態や熱平衡状態において量子状態を制御してはどうだろうか？それを如何にして機能化するのかという課題は新たに発生するものの、基底状態や熱平衡状態という系の最も安定な状態として量子状態が得られれば、その量子状態は容易には壊れないはずである。

では、基底状態や熱平衡状態として、どうすれば量子状態を得ることができるのか？実のところ、光場（電磁場）と物質とが相互作用（結合）する系（結合系）の基底状態は一般に、それらが量子論的にもつれた状態、正確に言えば、光場と物質場の2モードの量子スクイーズド状態となる。その量子スクイージングの度合いが顕著になるのは、光場と物質との結合が超強結合と呼ばれる領域（光子1個あたりの Rabi 振動（振幅のやり取り）のレートが、光や物質の共鳴振動数と同程度になる領域）に至った場合のみであり、多くの系では無視できる現象である。光場と物質との相互作用の過程のうち、回転波近似で従来無視されてきた過程によって、量子スクイージングが結合系の基底状態で発生する。念のために述べておくと、これは結合系の基底状態の話であり、励起光強度などで結合の強さを一概に調整できるものではない。

光場と物質の結合の強さは、物質と光共振器を適切に設計することで調整される。2009年頃から超強結合を示す様々な物理系が発見されている（詳しくは[1][2]を参照のこと）。基底状態や熱平衡状態で量子スクイーズド状態が得られることは、超強結合研究の初期から理論的に指摘されていたが、具体的にどのような状態が得られるかは最近まで理論的にすら解明されていなかった。私たちはそれを解明し、なおかつ超放射相転移（超強結合によって引き起こされる熱平衡下の相転移）の相転移点にて非常に強い量子スクイージングが得られることを理論的に見出した[3]。Fe³⁺マグノンと希土類スピン集団とが超強結合する磁性体 ErFeO₃が、超放射相転移を示すことが知られている現在の唯一の物理系である[4][5]。この物質の場合、外部磁場や温度によって、マグノンと希土類スピン集団との2モード量子スクイージングを制御できると期待される。

[1] A. Frisk Kockum, *et al.*, Nat. Rev. Phys. **1**, 19 (2019).

[2] P. Forn-Díaz, *et al.*, Rev. Mod. Phys. **91**, 025005 (2019).

[3] K. Hayashida, *et al.*, arXiv:2009.02630 [quant-ph].

[4] X. Li, *et al.*, Science **361**, 794 (2018).

[5] M. Bamba, X. Li, N. M. Peraca, and J. Kono, Commun. Phys. **5**, 3 (2022).