

共振器 QED 系における超蛍光-レーザークロスオーバーを用いた 新奇発光特性の理論的解明

Theory of novel photoluminescence based on superfluorescence-laser crossover in a cavity QED system

○瀬崎 陸^{1*}、石川 陽¹、宮島 顕祐²、小林 潔^{1,3}(1. 山梨大院工、2. 東理大院理、3. 東洋大経)

○Riku Sezaki^{1*}, Akira Ishikawa¹, Kensuke Miyajima², Kiyoshi Kobayashi^{1,3}

(1.University of Yamanashi, 2. Tokyo University of Science, 3. Toyo University)

*E-mail: g19dte06@yamanashi.ac.jp

超蛍光とは、複数の分極が光を介してコヒーレントに結合し、巨視的な分極が自発的に生成されることで生じる、協力的なパルス発光現象である [1]。超蛍光の起源は自然放出自ら真空場の揺らぎをトリガーとして形成される Dicke 状態と呼ばれる複数分極間の量子力学的な重ね合わせ状態である。したがって、超蛍光はマクロな量子力学的現象とみなすことができ、Bose-Einstein 凝縮における巨視的量子コヒーレンスや真空場などの量子力学的性質を追求するためのツールとしても期待されている [2]。また、近年ではレーザーに代わる超短パルスコヒーレント光源への応用やマクロな量子揺らぎの観測などを目的として固体における超蛍光の研究が盛んに行われている [3,4]。また、ナノ構造を用いて光の空間構造の相関をデザインすることで超蛍光を制御できる可能性も報告されている [5]。

我々は共振器 QED 系における超蛍光とレーザーを包括的に扱う理論を構築し、古典的現象であるレーザー、量子論的現象である超蛍光の両者を統一的に理解することを目的として研究を進めてきた。現在までの研究において、共振器の光閉じ込め効果に依存して超蛍光的またはレーザー的な二種類のコヒーレンス形成の存在とそれらのクロスオーバーを明らかにした [6]。さらに、超蛍光は光を介した複数分極間の同期現象と見なすこともできることから [7]、共振器 QED 系における複数分極に対する発光ダイナミクスを記述する全量子論的な Luminescence 方程式をもとに [6]、同期現象を記述する分極の位相ダイナミクスの方程式を

$$\frac{d\phi_j}{dt} = \omega_j - \frac{2g^2\langle\sigma_z^j\rangle}{R} \left[4\langle\sigma_z^j\rangle\langle b^\dagger b \rangle + 2\left(\langle\sigma_z^j\rangle + \frac{1}{2}\right) + NR \right] |Z| \sin(\phi_j - \Theta) \quad (1)$$

のように導出することができた [8]。式 (1) において、 $\phi_j, \omega_j, \langle\sigma_z^j\rangle$ はそれぞれ j 番目の分極振動の位相、2 準位系の共鳴周波数および占有率、 R は協力的な分極振動の振幅、 $\Theta, |Z|$ はそれぞれ分極集団の平均位相、同期の大きさを表す秩序変数、 $\langle b^\dagger b \rangle$ は共振器光子密度、 g は光子と分極の相互作用係数、 N は分極の総数である。この式 (1) は、振動子集団の同期現象を記述する蔵本モデルに相当し [9]、共振器 QED 系において自然放出自ら真空場揺らぎと誘導放出をトリガーとした分極集団の同期現象が起こることを表している。さらに、各種パラメータに依存して様々なメカニズムによる、複数分極間の同期現象と協力的発光現象が起こることを明らかにした [8]。

本講演では、過去の講演で明らかにされた様々なコヒーレンス形成メカニズムによる複数分極間の同期ダイナミクスに基づく発光特性の違いを明らかにする。導出された位相ダイナミクスの方程式 (1) をもとに、発光ダイナミクスと物質系のコヒーレンスの時間変化の関係、物質系からの放出光に対する二次の自己相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ を評価する。そして、物質系のコヒーレンスが光子系のコヒーレンスに転写されるメカニズムの解明を目指す。共振器 QED 系での超蛍光とレーザーのクロスオーバーが発生する状況下において、複数分極間における同期現象の観点から、多様なコヒーレンス形成に基づく新奇発光メカニズムとその発光特性の違いを明らかにし、そこで得られた知見を発展させ、光子場を介した複数分極間における巨視的量子コヒーレンス形成制御を理論的に提案する。なお、本研究は科研費 20K03808、20K04307 の補助を受けて行われたものである。

[1]R. H. Dicke, Phys. Rev. **93**, 99 (1954). [2]D. C. Dai *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 115206 (2011).

[3]K. Miyajima *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **21**, 195802 (2009). [4]M. Nasu, *et al.*, Appl. Phys. Express **13**, 062005 (2020).

[5]N. Yokoshi, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 203601 (2017). [6]R. Sezaki *et al.*, Appl. Phys. A **123**, 690 (2017).

[7]B. Zhu *et al.*, New J. Phys. **17**, 083063 (2015). [8]瀬崎 陸, 他, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会 9p-Z17-11.

[9]Y. Kuramoto, *et al.*, J. Stat. Phys. **49**, 569 (1987).