

ドレスト光子の高励起状態からの散逸とは？

三宮 俊(株式会社リコー)

E-mail: suguru.sangu@jp.ricoh.com

これまで、ドレスト光子の散逸現象について様々な思考を巡らせてきた。この散逸現象は、ドレスト光子物理ないしはオフシエル科学を実用的なデバイスに発展させるうえで極めて重要と考えている。例えば、間接半導体であるシリコンによる発光素子において、ドーパントであるボロン原子が電流アニール過程を経て特異な構造(ボロン対を形成すると考えられている)に固定化されるためには、ドレスト光子の熱(運動)エネルギーを自由光子として外界に放出する必要がある。発光機能の発現として、電流注入によるエネルギーを光として放出するメカニズムも同様である。ドレスト光子の散逸とは「ナノ物質内や物質界面に留まるドレスト光子を消滅させて、そのエネルギーを自由光子として外部に取り出す」と当たり前のよう考えてきたが、ここ最近、もしかしたら根本的に考え方が違うのかもしれない、と思い始めてきた。本稿では、著者が頭を悩ませている(まだ答えの出していない)状況について紹介したい。

上述のドーパントの固定化のことを、ドレスト光子自身が自由光子を放出しやすい場所(ドーパントの相対位置)を探索しているように見えることから、ドレスト光子の自律性(自律的構造形成)と呼んでいる。ドレスト光子介在の発光素子における自由光子放出の効率は一般的な自然放出よりも速く、誘導放出過程が働いているものと考えられる。誘導放出は、あるドレスト光子が励起された状態に対し第 2 のドレスト光子が相互作用する際、励起状態から強制的にドレスト光子(自由光子?)エネルギーを抜き去ることで第 2 のドレスト光子と位相を揃えてエネルギーを放出する現象である。つまり、2 個以上の複数のドレスト光子が関与する現象と言える。この状況を表現するために、ドレスト光子を束縛することのできる複数ノードからなる物質系に対し、複数個のドレスト光子が複数ノードを占有する全ての状態を基底状態として扱う数値シミュレーションモデルを検討している[1]。例えば、3 個のノードからなる系では 0~3 個のドレスト光子を励起することが可能であり、量子密度行列を用いた数値シミュレーションでは $\sum_{k=0}^3 {}_3C_k = 8$ 個の基底状態による行列を考え、散逸を含む量子密度行列の運動方程式である Lindblad 方程式を数値的に解くことによりドレスト光子の時間発展を算出する。

得られた数値シミュレーション結果を基に自由光子の放出をともなう散逸現象を考えると、これは系内に励起された N 個のドレスト光子を $(N-1)$ 個に遷移させる過程であり、また、ドレスト光子の個数が変化しない状況では、基底状態間の章動運動などの可逆的なエネルギー移動が系内で維持継続されている。外部に自由光子を取り出す散逸現象を明確に記述し、可逆的な運動を平衡状態として表現できるように、ドレスト光子の個数ごとに量子密度行列を部分行列に分割し、ドレスト光子個数の等しい状態のみを対角化する基底変換の方法を考案した[1]。これにより、物質境界やドーパント位置を反映したドレスト光子の空間モードのような基底状態を抽出できる。この基底状態を数式により概念的に表記すると、例えば、3 ノードの系を 2 個のドレスト光子が占有している場合、 $|\phi_2\rangle = c_{2,1}|e, e, g\rangle + c_{2,2}|e, g, e\rangle + c_{2,3}|g, e, e\rangle$ のように、基底変換前のノードに束縛されたドレスト光子の基底状態の重ね合わせ状態が基底変換後の新しい基底状態である。

ここで、上記の基底変換に対し著者が思い描いている 2 つのイメージについて説明したい。第

1 のイメージは、以前 *Symmetry* 誌にて発表した論文[2]に対応するものであり、空間的なスケール変換である。多数の空間モードに再構成することは、空間的に一様に広がった状態や、局所位置に留まった状態、その中間的な状態などに分解することである。(ただし、[2]ではドレスト光子が系内に多数存在する状態は考慮していない。)空間的な広がり大きなものから小さなものに対応して、ドレスト光子の質量が軽い状態から重い状態と見なすことができ、ドレスト光子の質量の軽い状態が、自由光子のモードと結合しやすく、散逸現象に寄与するものと考えた。

第 2 のイメージは、Dicke の超放射と呼ばれる現象からの類推であり、ノード間の距離が狭くなるとドレスト光子の集団運動が誘発され、複数のノードのドレスト光子が位相を揃えて緩和する(光子を放出することにより緩和速度が速くなる、という効果が発動していると考えている。上述の重ね合わせ状態において、 $c_{2,1} = c_{2,2} = c_{2,3} = 1/\sqrt{3}$ で表わされる状態は Dicke 状態と呼ばれ、 $|e, e, e\rangle \rightarrow (|e, e, g\rangle + |e, g, e\rangle + |g, e, e\rangle)/\sqrt{3} \rightarrow (|e, g, g\rangle + |g, e, g\rangle + |g, g, e\rangle)/\sqrt{3} \rightarrow |g, g, g\rangle$ のような遷移を考えると、励起個数の異なる状態間の遷移確率は $3\gamma \rightarrow 4\gamma \rightarrow 3\gamma$ のように変化し、中間の励起個数の状態で緩和の加速が起こる[3]。Dicke の超放射は、対称な重ね合わせ状態における緩和が高速であることを述べており、見方を変えると、顕わに記述されていない反対称状態が緩和に寄与しない Dark 状態としてはたらくことで、散逸経路が限定的となり、速い緩和だけが支配的になると捉えることもできる。著者がいま、ドーパントの自律的構造形成の起源の一つとして注目しているのは、超放射ライクな、緩和の速い状態間遷移が効率的な誘導放出を促しているというシナリオである。一つ断りを入れておくと、上記重ね合わせ状態の重み係数はナノ物質系の境界やドーパント位置の影響を反映している点で、無限空間を前提としている上述の Dicke 状態(の簡略的な説明)とは差異がある。

さて、ここで冒頭に、「ドレスト光子を消滅させて、そのエネルギーを自由光子として外部に取り出す、という物理描像が根本的に違う」と述べた点について言及したい。第 2 のイメージとして述べた超放射的な振る舞いであるが、これは第 1 のイメージの空間的な分布とも関連しており、すなわち、ドレスト光子の個数を変える遷移にはパリティ選択則のような許容および禁制遷移がある。(境界の影響で完全に偶奇とも言えないので、少し曖昧な表現となった。)空間的に反対称な状態というのは双極子禁制遷移であり、自由光子場との直接結合はできないわけであるが、複数個のドレスト光子からなる集団励起状態からドレスト光子を 1 個減らし異なるに状態に遷移することは可能であり、その際の余剰分のエネルギーが自由光子であると言える。複数のドレスト光子を保有した超放射状態からの緩和現象として、ある空間分布をもつドレスト光子が異なる空間分布をもつ基底状態に移る際に自由光子を放出している、という解釈ができそうである。少し表現を変えると、大きな空間構造をもつドレスト光子状態が自由光子を放出して、より小さな空間構造をもつドレスト光子状態にスケールダウンする際に自由光子を放出する、というイメージを頭に描くが、これは正しいのだろうか？

未熟な考察に便乗して、最近のドレスト光子研究起点でのディスカッションにおいてご指摘いただいた、超放射現象とのアナロジーと *Spacelike momentum support* という状況についても、未だ理解が及ばないながら触れておきたい。上述した異なる空間分布を有するドレスト光子の基底状態間の遷移というのは、外界からは見えない Dark 状態により制御された現象であり、*light cone* の *off-shell*(*spacelike momentum*)領域におけるダイナミクスと考えてもよさそうに思われる。一見、自由光子の放出に影響を及ぼさない Dark 状態が背後でドレスト光子のエネルギー移動を決定づけることで光学機能の発現すなわち散逸現象を設計できるという解釈はできないであろうか？最後に述

べた部分は未だ手探り状態でしかないが、試行錯誤を繰り返している中で、ドレスト光子の本質である off-shell 領域の科学に段々と近づいてきているように感じている。

参考文献

- [1] S. Sangu, et al., *Symmetry* 13 (2021) 1768.
- [2] 三宮, レーザー学会学術講演会第 44 回年次大会 (2024) S03-18p-VIII-07.
- [3] M. Gross and S. Haroche, *Phys. Rep.* 93 (1982) 301.