

近接場光学における非共鳴効果の理論 III: 非線形応答理論によるドレスト光子の基礎づけの試み, ゲージ条件の検討 Theory of Non-resonant Effect in Near-field Optics III: Approach to a Base of Dressed Photon employing Non-linear Response Theory under a Preferable Gauge Condition

○坂野 齋¹, 大津元一^{2,3}

(1. 山梨大院, 2. 東大院工, 3. ドレスト光子研究起点)

○I. Banno¹, M. Ohtsu^{2,3}

(1. Univ. of Yamanashi, 2. Univ. of Tokyo, 3. Research Origin of Dressed Photon)

E-mail: banno@yamanashi.ac.jp

川添・大津らは非共鳴条件下での様々な実験 [3,4] によりドレスト光子が原因と目される近接場光学 (NFO) 特有の現象を発見, 実用に供してきた. 理論的には多フォノンが関わるモデルで説明され [5], 近頃, 光学フォノンが関わる実験的証拠が得られている [6].

ドレスト光子は光の波長程度以下のサイズ (a) の空間での電磁場の一般的存在形態として, 詳細なモデルに依らずに理解できる. このような「光」を観測できたら, それには \hbar/a 程度の運動量の不確定さが伴う. この「光」は, 真空中の光やバルク物質中の光 = オンシエルの光の分散関係から外れたオフシエルの光 = ドレスト光子であり, その存在は環境との相互作用に支えられている. 川添・大津の実験はフォノンを含む環境の自由度と相互作用しているオフシエルの光 = ドレスト光子を積極的に利用するために非共鳴条件を使っていると解釈できる.

本理論は, 非共鳴条件下での電子と電磁場環境との相互作用を明らかにしてドレスト光子を第 1 原理から基礎付けることを目的としている. そのために私たちは光源であるナノ構造近傍の多電子系という NFO 系を記述するのに相応しい線形・非線形応答関数を第 1 原理から定式化してきた [1]. その応答関数は, NFO 系に共存するスカラー・ベクトルポテンシャル ($SP \phi \cdot VP \mathbf{A}$) を応答の原因として対等に扱い, 結果である誘導電荷・電流密度と関係づける. n 次の非線形応答関数は作用積分の $\phi \cdot \mathbf{A}$ による $(n+1)$ 階の汎関数微分として Heisenberg 演算子の形式で得られ, 電荷保存則とゲージ不変性を保証する.

この方法により非共鳴条件下の NFO 系には, 線形・非線形応答関数に \mathbf{A} により強調される寄与があり, 誘電率による記述が破綻することを示し, また, 前回は非線形感受率演算子の漸化式を検討し, 電磁ポテンシャルと感受率演算子を再定義して非共鳴条件に相応しい描像を導いた [2]. この再定義はもともとの $SP \phi$ に, 非相対論下でスカラーとなる VP の 2 乗 \mathbf{A}^2 に比例した項が付加する非線形変換である. これにより光学フォノンに伴う電磁場や局所磁場など環境に存在する VP が SP と同じ資格で応答に関われ, NFO 系で顕現するドレスト光子の記述として相応しく思える. この $SP \cdot VP$ の非線形変換では特定のゲージが理論上好ましいものとして選択される可能性があり, 本講演ではこの点を議論する.

通常の光学系では ϕ (縦電場) を荷電粒子間のクーロン相互作用に転化して応答の原因として扱わないところ本理論では NFO 系の応答の原因として考慮することにより以上の議論が可能になる. 実は NFO は $SP \phi$ を介して多電子問題と不可分である. クーロン相互作用こそは物質の多様な存在形態の原因であり, NFO 系の非共鳴条件下ではその変調により, ドレスト光子 = オフシエルの光が活躍する新しいパラダイムがあると私たちは考えている.

謝辞: 本研究の一部は (公財) 光科学技術研究振興財団の研究助成を受けています.

[1] 坂野 齋, "ナノ構造と非放射場の理論," 応物講演会 (2013 秋 17p-D2-2); "非放射場と放射場を対等に扱う単一感受率による光学の理論 I, II, III, IV, V", 応物講演会 (2013 秋 18p-C13-1, 2014 春 17p-F6-5, 秋 18p-C1-1, 2015 春 12a-A12-1, 2016 春 19a-S622-13).

[2] 坂野 齋, "近接場光学における非共鳴効果の理論 I, II" 応物講演会 (2017 春 15a-F202-12, 秋 7a-A405-9); I. Banno, "Response Theory in Near-field Optics: Two Distinct Dipole Transitions", 14th International Conference on Near-field Optics, Nanophotonics, and Related Technics, (浜松市, 2016 We-10A-5); 坂野 齋, "近接場光学における 2 種の双極子遷移", Optics and Photonics Japan 2016 (2016 秋 1PC3).

[3] 川添 忠, 杉浦聡, 大津 元一, "高出力ホモ接合シリコンレーザーの作製 (1), (2)", 応物講演会 (2017 春 15a-F202-9, 秋 7a-A405-5); T. Kawazoe and M. Ohtsu, "Bulk crystal SiC blue LED with p-n homojunction structure fabricated by dressed-photon-phonon-assisted annealing", Appl. Phys. A, **115**, 127-133, (2014); M. A. Tran, T. Kawazoe, M. Ohtsu, "Fabrication of a bulk silicon p-n homojunction-structured light-emitting diode showing visible electroluminescence at room temperature", Appl Phys A **115**, 105-111 (2014).

[4] For review articles: M. Ohtsu, "Progress in Dressed Photon Technology and the Future", in *Progress in Nanophotonics 4* eds. by M. Ohtsu and T. Yatsui (Springer, 2017) Chap. 1; M. Ohtsu, "Dressed photon technology", *Nanophotonics 1* 83-97 (2012).

[5] T. Kawazoe, K. Kobayashi, S. Takubo, and M. Ohtsu, "Nonadiabatic photodissociation process using an optical near field", J. Chem. Phys. **122**, 024715 (2005); K. Kobayashi, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, "Importance of Multiple-Phonon Interactions in Molecular Dissociation and Nanofabrication Using Optical Near Fields", IEEE Trans. Nanotech. **4**(5) 517-522 (2005).

[6] T. Kawazoe, K. Nishioka, and M. Ohtsu, "Polarization control of an infrared silicon light-emitting diode by dressed photons and analyses of the spatial distribution of doped boron atoms", Appl. Phys. A **121**, 1409-1415 (2015); M. Yamaguchi, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, "Evaluating the coupling strength of electron-hole pairs and phonons in a 0.9 μ m-wavelength silicon light emitting diode using dressed-photon-phonons", Appl Phys A **115**, 119-125 (2014); N. Wada, M. A. Tran, T. Kawazoe, and Motoichi Ohtsu, "Measurement of multimode coherent phonons in nanometric spaces in a homojunction-structured silicon light emitting diode", Appl. Phys. A **115**, 113-118 (2014).