

近接場光学における非共鳴効果の理論 II: 非線形応答理論によるドレスト光子の基礎づけの試み

Theory of Non-resonant Effect in Near-field Optics II: Approach to a Base of Dressed Photon employing Non-linear Response Theory

○ 坂野 齋¹, 大津元一^{2,3}

(1. 山梨大院医学工学総合, 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

私たちは光源であるナノ構造近傍の多電子系という近接場光学 (NFO) 系に相応しい線形・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、近接場光学系に共存するスカラー・ベクトルポテンシャル (SP ϕ ・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 ϕ ・ \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。本発表では、n 次と (n+1) 次の非線形応答関数の漸化式を議論する。例えば、n = 2 の場合、次のようになる：

$$\begin{aligned} \hat{\chi}_{\mu_1 \mu_2 \mu_3}^{\mu}(x, x_1, x_2, x_3) = & \frac{1}{3} \frac{-q}{mc^2} \left\{ \delta^4(x_2 - x_3) \tilde{\delta}_{\mu_2 \mu_3} \hat{\chi}_{\mu_1 0}^{\mu}(x, x_1, x_2) + \begin{pmatrix} 123 \\ 231 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 123 \\ 312 \end{pmatrix} \right\} \\ & + \frac{1}{3} \frac{1}{\hbar c^2} \left\{ \theta(ct_2 - ct_3) \left[\hat{\chi}_{\mu_1 \mu_2}^{\mu}(x, x_1, x_2), \tilde{j}_{\mu_3}^{(in0)}(x_3) \right] + \begin{pmatrix} 123 \\ 231 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 123 \\ 312 \end{pmatrix} \right\}. \end{aligned} \quad (1)$$

非相対論だが電荷保存則とゲージ不変性の可視化のため 4 元表示を使い $\tilde{\delta}_{\mu'}^{\mu}$ は $\mu = \mu' = 1, 2, 3$ に対し $\tilde{\delta}_{\mu'}^{\mu} = 1$, そうでない場合、 $\tilde{\delta}_{\mu'}^{\mu} = 0$, また、 $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$ は示数を輪環順で置換した項である。前回の発表で線形応答関数に非共鳴条件下の NFO 系で \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述べた [2]。Eq.(1) にも同様の構造があり、第 1 項によって \mathbf{A} を伴う光学フォノンが NFO 系の非共鳴非線形過程に強く寄与できる。川添・大津らは非共鳴条件下での様々な実験 [3,4] でドレスト光子を利用して NFO 特有の現象を発見、実用に供してきた。理論的に多フォノンが関わるモデルで説明され [5]、特に光学フォノンが関わる実験的証拠が得られている [6]。このようなドレスト光子とフォノンの関わりについて第 1 原理から基礎付けを試みる。

NFO は縦電場 (ϕ 自由度) を介して多電子問題と関係する；非摂動状態の基底状態、励起状態を束縛状態 (分子や固体) に保っているのは交換・相関相互作用という量子論的多電子効果である。通常の方法と異なり ϕ を電子間相互作用に転化しない本理論では密度汎関数法の考えを用い、多電子系に内在する ϕ と入射される ϕ を切り分け、後者を入射される \mathbf{A} と対等に扱う処方をとっている。これにより NFO の非線形過程の系統的な解析が可能となる。

[1] 論文投稿予定; 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," 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" 応物講演会 (2017 春 15a-F202-12); 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 年 9 月 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", 応物講演会 (2017 春 15a-F202-9); 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).

[7] P. Hohenberg and W. Kohn, Phys. Rev. **136**, 3864 (1964); W. Kohn and L. J. Sham, Phys Rev. **140**, A1133 (1965).