

光近接場相互作用を介した量子ダイナミクスの理論的解明

Theoretical study on quantum dynamics via optical near-field interactions

山梨大学 °矢崎 智昌, 岡田 遼, 石川 陽, 小林 潔

University of Yamanashi. °T. Yazaki, R. Okada, A. Ishikawa, and K. Kobayashi

E-mail: g16tz020@yamanashi.ac.jp

1. 研究背景と目的

これまでの研究において、光と微小な物質の相互作用を扱う際は、光は波長に比べて十分に遠方から物質系へ入射し、その応答を十分遠方で観測することを前提としていた、そのため、光の波長より十分小さい物質に対して、長波長近似により光は空間的に一様であると仮定し、物質系に重点を置いた定式化が行われてきた。しかし、ナノメートル領域での光学過程を扱う際には、ナノ領域における光と物質の相互作用によって生ずる光近接場が重要であるため、光と物質を同等に取り扱うことが必要となる[1]。本研究では、電子系と光系を同等に量子論的に取り扱い、全系のダイナミクスを解析することにより、光近接場相互作用の理論的検討を行う。

2. 理論

本研究では、最も基本的な系として自由光子場を考え、その場中にナノ物質が置かれたときに光近接場の特性が現れるかを議論したい。そのため、ナノ物質に閉じ込められた電子系として空間的に異なる2個の二準位系を考え、自由光子場が双極子相互作用するモデルを考える。二準位系のポピュレーション、分極、分極間の相関、光子密度に関する閉じた連立時間発展方程式である Luminescence 方程式を導出する。特に、分極間の光を介した相関を表す propagator を用いてまとめることで[2]、物質系の量子ダイナミクスにおいて、光と物質の相互作用を起源とする non-Markov 過程を導出することができる。本講演では、さらに Markov 近似を行うことにより、光近接場相互作用の特性が現れるための条件について考察を行う。

3. Markov 近似下での考察

Markov 近似下で光が二次分散であると仮定すると propagator は次式のように表せる。

$$G(|\vec{r}_\ell - \vec{r}_{\ell'}|, \omega_\ell) = \frac{3m_p \pi}{16\hbar\epsilon_0 |\vec{r}_\ell - \vec{r}_{\ell'}| m_{ex} a^2} \left\{ 2\sin\left(\sqrt{\frac{3m_p}{m_{ex}}} \frac{\pi}{a} |\vec{r}_\ell - \vec{r}_{\ell'}|\right) - \alpha e^{-\sqrt{\frac{3m_p}{m_{ex}}} \frac{\pi}{a} |\vec{r}_\ell - \vec{r}_{\ell'}|} \right\}$$

線形分散では自由光子の性質のみが現れるが、二次分散を仮定することで湯川型関数の項が現れ、物質のサイズ程度で減衰する光近接場相互作用の特徴が現れることが分かった。

4. まとめと展望

全量子論的な Luminescence 方程式を用いて光近接場相互作用の検討を行った。光が二次分散を持つとき光近接場相互作用の特性が現れることを明らかにした。今後は、non-Markov 過程の影響、二次分散の起源等を明確にし、光近接場の起源と定義を確立したい。

[1] 大津 元一, 小林 潔, 『近接場光の基礎—ナノテクノロジーのための新光学 ナノフォトニクス、アトムフォトニクスのための微小領域の電磁現象の古典論と量子論』 (オーム社, 2003)

[2] 余越 伸彦, 小田切和喜, 石川 陽, 石原 一, 日本物理学会第 71 回年次大会, 22aBH-5 (2016)