



Title	Nonlocal Response Theory in Near-field Optics
Author(s)	牛田, 淳
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/41506
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名	牛田 淳
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 14749 号
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 基礎工学研究科物理系専攻
学位論文名	Nonlocal Response Theory in Near-field Optics (近接場光学の非局所応答理論)
論文審査委員	(主査) 教授 張 紀久夫
	(副査) 教授 冷水 佐壽 教授 伊藤 正

論文内容の要旨

本論文では、近接場光学に関する問題として、[1] 共鳴条件下において走査型近接場光学顕微鏡(SNOM)により得られる近接場像、[2] 近接場を介した相互作用による原子の輻射補正、について取り上げ、微視的非局所応答理論により理論的解析を行った。

走査型近接場光学顕微鏡は表面のごく近傍に局在している光(近接電磁場)を先端を尖らせた光ファイバープローブなどによって走査することにより光の波長以下の構造を観測することができる装置である。この顕微鏡で得られる信号強度は物質に誘起された分極が放射する電磁場であり、その信号強度をプローブの位置の関数としてマッピングした近接場像は単に試料表面の幾何学的構造だけでなく励起電子状態に起因する光学的性質の個性を反映した情報を含んでいる。それゆえ共鳴光を利用して信号強度の増強や解像度の向上を図るとともに、入射光のエネルギー、観測する光のエネルギーを変えての試料の場所に依存した分光の情報や微視的な固有分極モードの情報を得ることができると考えられる。そのような意味から考えると、本研究はこの“顕微鏡”により得られる像が一体物質の何を見ているのかを改めて問い合わせること、更には、そのような微視的な系の共鳴応答の理論解析には、従来の光学応答理論(巨視的局所的応答理論)では不十分であり、微視的、且つ非局所的な光学応答理論が必要であることを主張するものもある。

そのような系を扱う理論的枠組として、誘起分極の非共鳴部分からの寄与を、光のGreen関数に繰り込むことにより微視的非局所応答理論が再定式化できることを示した。この理論を用いて半無限媒質上に半導体微小球からなるプローブ、試料を置いたモデルに対して近接場像を計算した。入射光のエネルギーを一定にして走査したとき、プローブの位置の関数の関数として全系(プローブ、試料、基板)の固有モードと輻射補正が敏感に変化するため、共鳴の度合に応じて信号強度分布が大きく変化することを示した(配置共鳴効果)。

またこの顕微鏡を使った実験においては、光の入射、受光の仕方により反射モード、照射モード、集光モードなどと呼ばれる操作モードがある。この操作モードの違いが信号強度分布にどのように反映されるかについても調べた。全系の共鳴エネルギー(物質系のエネルギー位置と輻射補正)は操作モードには依らないことが解析的に示され、操作モードによる近接場像の違いは系の共鳴分極の情報をどのように取り出しているのかに依存しているということを明らかにした。またそれぞれのモードにおける近接場像を数値計算することにより、操作モード依存性の起源について議論した。

更に原子などのミクロな共鳴物質の輻射幅がそばにある誘電媒質（半無限媒質、球型媒質）の影響を受けてどのように変化するかについて、再定式化された非局所応答理論により解析を行った。半無限媒質がある場合の原子の輻射幅に関して非局所応答理論による結果が量子電磁気学から得られる結果と厳密に一致することを示した。また、球型媒質の場合については、球型共振器の電磁場の固有モードである whispering gallery (WG) モードと原子が近接電磁場を介して相互作用することにより、真空ラビ分裂をともなった新しい結合モードができるこことを示した。またその結合モードは、原子の励起エネルギーが WG モードの共鳴エネルギーに近付くにつれて輻射幅の奪い合いを起こし、結合が強い場合はクロスオーバーが見えることを示した。このことは非局所応答理論から一般的に導かれる全系の輻射幅に関する保存則とも合致した結果である。

論文審査の結果の要旨

本論文では、微視的非局所応答理論によって近接場光学に関連する 2 つの問題の理論的解析を行った。

[1] 共鳴条件下において走査型近接場光学顕微鏡 (SNOM) により得られる近接場像：SNOM 像は単に試料表面の幾何学的構造だけでなく励起電子状態に起因する光学的性質の個性を反映した情報を含んでいるという観点から、共鳴光を利用した SNOM について光の振動数・偏光や SNOM の操作モードにより信号像にどのような特徴が現れるかを考察した。微小な物質系に生じる誘起分極を記述するには、微視的・非局所的な光学応答理論が必要であるが、それについてまず、誘起分極の非共鳴部分からの寄与を、光の Green 関数に繰り込むことにより、微視的非局所応答理論を扱いやすい形に再定式化できることを示した。数値計算のモデルとしては、半無限媒質上に（光の波長に比べて）微小な試料・プローブを置いたものを考え、試料・プローブは共鳴準位を持つ半導体微小球から構成した。入射光振動数を一定にして走査したとき、プローブ位置の変化とともに全系の共鳴エネルギーが敏感に変化するため、共鳴の度合に応じて信号強度分布が大きく変化することを示した（配置共鳴効果）。また SNOM においては光の入射・受光の仕方により反射モード、照射モード、集光モードなどと呼ばれる操作モードがあるが、全系の共鳴エネルギーは操作モードには依らないこと、操作モードによる近接場像の違いは系の共鳴分極の情報をどのように取り出すかで決まること、を明らかにした。またそれぞれのモードにおける近接場像を数値計算することにより、操作モード依存性の起源を明らかにした。

[2] 近接場を介した相互作用による原子の輻射補正：原子などのミクロな共鳴物質の輻射幅がそばにある（半無限・球型）誘電媒質の影響を受けてどのように変化するかについて、再定式された非局所応答理論により解析を行った。半無限媒質近傍における原子の輻射幅に関して、非局所応答理論による結果が量子電磁気学から得られる結果と厳密に一致することを示した。また、球型誘電体における電磁場の固有モードである Whispering Gallery (WG) モードと原子励起が近接電磁場を介して相互作用することにより、真空ラビ分裂をともなった新しい結合モードができるこことを示した。またその結合モードは、原子の励起エネルギーが WG モードの共鳴エネルギーに近付くにつれて輻射幅の奪い合いを起こし、結合が強い場合はクロスオーバーが見えることを示した。

以上のように、本論文では近接場光学における未開拓の問題を独自に開発した方法論により詳しく分析して有意義な結果を得ており、博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。