

平成21年 5月20日現在

研究種目： 基盤研究 (B)

研究期間： 2006-2008

課題番号： 18340119

研究課題名 (和文) ナノファイバー近接場による原子と光の操作と制御

研究課題名 (英文) Manipulation and Control of Atoms Using Nanofiber Evanescent Field

研究代表者

白田 耕藏 (HAKUTA KOHZO)

電気通信大学・電気通信学部・教授

80164771

研究成果の概要：

光波長の約1/2の直径の極細光ファイバー (ナノ光ファイバー) により原子と光子を操作する方法について実験及び理論の両面から研究を行った。原子としてレーザー冷却したセシウム原子を用い、ナノ光ファイバーにより原子の自然放出は操作・制御できることを実証した。自然放出光は自由空間と大きく異なり、ファイバーの伝播モードへ効率良く放出される。また、単一から少数個の原子の量子光学的振舞いを光子相関計測により系統的に研究した。更に、原子表面相互作用の高精度計測にも道を拓いた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2007年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学 原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード： 量子エレクトロニクス、量子光学

## 1. 研究開始当初の背景

2003年にHarvard大のMazur等は特別に工夫したファイバー引き伸ばし法を開発し、ファイバー直径が50nmにも達するナノファイバーを作製し、ナノフォトニクスの新しい技術として注目を集めた。更に様々なナノファイバー作成法が示され種々の応用が提案されていたが、量子光学や原子操作の視点からナノファイバーを捉える研究は存在しなかった。筆者らは、これらの流れとは独立に2002年以来、ナノ光ファイバーを用いて原子と光の双方を光吸収断面積程

度の領域に閉じ込める方法を理論的に検討し報告していた。筆者らの発想の要点は輻射場のモード密度を操作し自然放出を制御することであり、共振器量子電気力学の物理をナノ光ファイバー系に拡張することである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、ナノ光ファイバー近傍に実現できる輻射モードの局在や強い光強度を量子光学の視点から捉え、原子や光を操作する新しい方法として研究し、量子

情報通信等に適用可能な新技術を開拓することである。本計画では、ナノファイバー近傍で十分な相互作用時間を実現するため、原子系として極低温のレーザー冷却原子を用いる。本計画の第一義的な目的は、ナノファイバーを作製する技術を確認し、この技術と原子のレーザー冷却技術を組み合わせ、ナノファイバー近傍の輻射場モードの局在化によりファイバー伝播モードへの高効率な自然放出を実証し、それを用いて新しい光学過程を設計することである。対象とする原子はセシウム原子である。ナノファイバー近傍の原子の振舞いは未開拓の課題であり、量子光学のみならず両面物理の視点も導入し研究を実施する。また、ナノファイバーによる量子操作・制御の実験的研究を実施するには、その指針を与える理論研究が不可欠である。本研究ではナノファイバーによる量子光学についての理論研究も実施する。

### 3. 研究の方法

本計画は3年計画である。初年度でナノ光ファイバー作成および取り扱いの技術を確認する。また、レーザーシステムを改良し制御性の良い磁気光学トラップ (MOT) システム、微弱蛍光計測システムを確認する。全システムを動作させナノファイバーによるMOTからの蛍光の検出測定を行う。第2年度、3年度においてナノ光ファイバーによる量子光学過程を応用を視野に入れた基礎的な立場から研究する。量子光学的研究のキー手法は光子相関計測である。一方、観測原子がナノファイバー表面近傍にのみ存在することから、原子表面相互作用 (van der Waals相互作用) の物理についても研究を実施する。計画における具体的研究方法を以下に示す。

1. ナノファイバーを定量的に作成する技術及びその取り扱い技術を確認する。
2. 安定で十分な出力を持つレーザーシステムを作製する
3. 磁気光学トラップ (MOT)、ナノファイバーを組み込んだ超高真空システムを完成させる。
4. MOT中の冷却原子からの蛍光測定法を確認する。
5. ファイバー伝播モードによる MOTの蛍光観測法を確認する。
6. ナノファイバーによる少数原子の光子相関計測法を確認する。
7. ナノファイバーにより van der Waals相互作用をレーザー分光学的に研究する方法を確認する。
8. ナノ光ファイバーにより可能となる新しい光学過程について議論する。

### 4. 研究成果

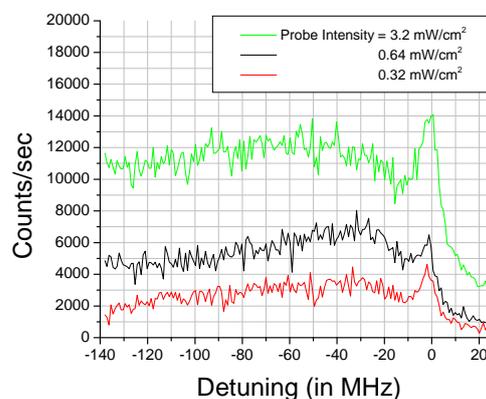
ナノファイバーによる原子と光子の操作について、磁気光学トラップ (MOT) 中で約  $200 \mu\text{K}$  の極低温にレーザー冷却したセシウム原子を用いて、実験及び理論の両面から研究を行った。

本課題研究によりナノ光ファイバーが量子光学の分野において、少数原子操作、少数光子発生、光子相関計測、単一光子制御、原子表面相互作用の超高精度観測、などにおいて極めて有用な方法を与えるものであることが示された。これまでの成果により今後は、更に量子情報工学的な応用を具体的な視野に入れた研究に道を拓いた。

実験的成果の例を具体的に以下に示す。

#### (1) 高感度原子検出

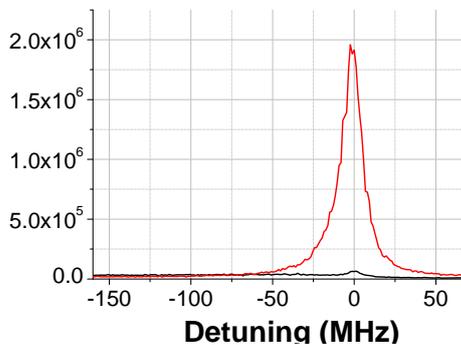
実験面では、まず直径400nmのナノファイバーを単一モード光ファイバーの加熱延伸により作成する方法を確認した。また、冷却セシウム原子をナノファイバーと重ね、蛍光を単一光子計測で観測する手法を確認した。また、励起スペクトルから、ナノファイバー近傍の原子が van der Waals (vdW) 相互作用により原子とナノファイバーからなる分子のように振る舞うことが示され、光会合遷移 (下図の離調ゼロでのピーク) や分子遷移 (ブロードなスペクトル) が明瞭に観測できた。この結果は本計画にとっては副産物ではあるが、原子と表面の相互作用を原子のレーザー分光の精度で精密に研究する手法を開拓したことになる。



#### (2) 表面状態制御

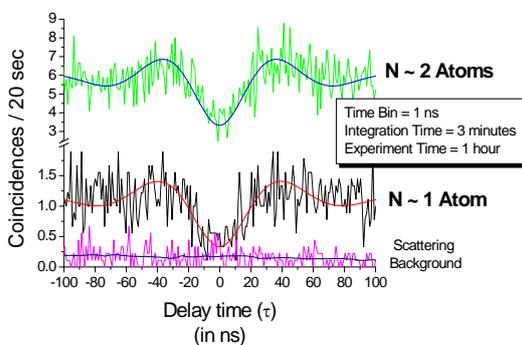
一方、量子光学の視点からすれば表面近傍の原子がvdWポテンシャルに補足され分子的に振舞うのは好都合ではない。理論解析によればナノファイバー表面が理想的に平坦であれば原子の補足は無視できる。分子的振舞いの観測はナノファイバー表面に何らかの微細ナノ構造が存在することを示している。本研究で、ナノファイバーと重ねたMOT中の原子集団を紫外線レーザー照射することにより表面をクリーン

アップする方法を確立した。この方法により名のファイバー表面近傍の原子はvdWポテンシャルに補足されることなく原子的に振舞う状況が実現でき、ナノファイバー/原子系の量子光学に道を拓いた。下図の赤のピークがクリーンアップされた表面による信号であり、離超ゼロのピークはクリーンアップ前の信号よりも30倍増強されている。



### (3) 単一原子検出

ナノ光ファイバー表面の近接場内に実現される量子光学過程の研究を行った。特に、ナノ光ファイバー表面の低温セシウム原子集団について、ファイバーの伝播モードに放出される自然放出光の光子相関を系統的に調べ、名の光ファイバーにより単一原子が明瞭に観測できることを示した。かつナノファイバー近傍での原子の滞在時間も実測した。

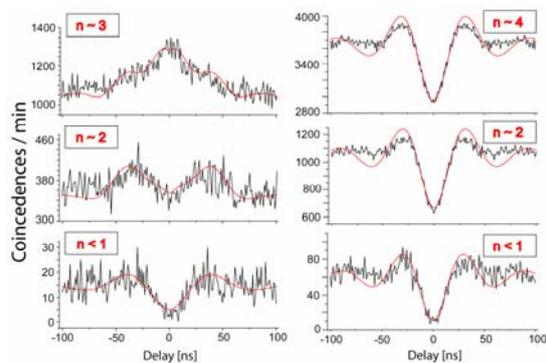


上図は Hanbury-Brown Twiss の実験配置で観測した光子相関結果である。アンチバンチングのディップが明瞭に観測されており、単一原子の観測が実現されている。更に長時間の相関計測を行い原子の滞在時間も計測した。

### (4) 光子相関の単一モード計測

光子相関については、原子集団がナノファイバーの一方の側に放出する光子についての Hanbury-Brown&Twiss 配置での計測（片側相関）と共に、ナノファイバーの両側に放出する光子についての相関計測（両側相関）を行った。原子が 1 個の場合は片側相関も両側

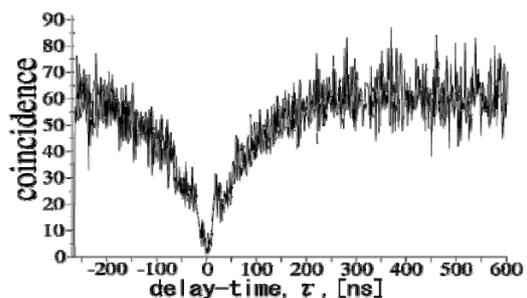
相関も同等にゼロ遅延時間でのアンチバンチングの振舞いを示す。しかし、原子数を 2 個、3 個と増やすにつれて、片側相関ではアンチバンチングは不明瞭になり、ついにはゼロ遅延時間でバンチングの振舞いを示すが、両側相関ではアンチバンチングが明瞭に観測され続ける。この効果を多数の原子が単一の空間モードに光子を放出したときに生ずる干渉効果として説明した。片側相関では多数の原子による光波の一次の干渉が現れ、それがゼロ遅延時間で最大値を与える。この効果は、原子数が多くなるにつれて顕著になる。一方、両側干渉では一次の干渉は多数の原子の乱雑な分布のため消失し、単一原子による光子相関のアンチバンチングが常に観測される。通常の光子相関の実験では単一空間モードでの観測は困難なため、このような効果は観測されない。原子数を 1 個から漸次に変化させ原子の自然放出を単一空間モードで定量的に観測したのは本研究が最初の例である。



上図左側が片側相関、右側が両側相関の結果である。理論結果は赤線であり、極めてよい一致を示している。

### (5) 量子ドットへの拡張

更に、冷却原子系で確立した方法を量子ドット系に拡張する試みも行った。量子ドット (CdSe ナノ結晶) をナノファイバー上に担持し、少数ドットが観測できることを示した。原子系で開発した観測操作法を適用しドット数を制御して定量的な研究を行った。下にナノファイバー上の単一量子ドットによるアンチバンチング観測結果を示す。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文：査読有] (計 16 件)

- (1) K. P. Nayak, Fam Le Kien, M. Morinaga, K. Hakuta, “Antibunching and bunching of photons in resonance fluorescence from a few atoms into guided modes of an optical nanofiber”, Phys. Rev. A, **79**, 021801(R) (09).
- (2) Fam Le Kien, K. Hakuta, “Slowing down a guided light field along a nanofiber in a cold atomic gas”, Phys. Rev. A, **79**, 013818 (09).
- (3) Fam Le Kien, K. Hakuta, “Effect of the orientation of a weak magnetic field on the radiative decay of a cesium atom near a nanofiber”, Phys. Rev. A, **78**, 063803 (08).
- (4) K. P. Nayak, K. Hakuta, “Single atoms on an optical nanofiber”, New J. Phys., **10**, 053003 (08).
- (5) Fam Le Kien, K. Hakuta, “Position distribution of cold thermal atoms in the vicinity of a dielectric surface”, Phys. Rev. A, **77**, 042903 (08).
- (6) K. Hakuta, “Single atoms on an optical nanofiber: A novel work system for slow light”, SPIE Proceedings, **6904**, 690406 (08).
- (7) Fam Le Kien, K. Hakuta, “Correlations between photons emitted by multiatom fluorescence into a nanofiber”, Phys. Rev. A, **77**, 033826 (08).
- (8) Fam Le Kien, K. Hakuta, “Cooperative enhancement of channeling of emission from atoms into a nanofiber”, Phys. Rev. A, **77**, 013801 (08).
- (9) 白田耕藏、「原子の光応答操作の新しい展開：量子非線形光学」、応用物理(解説), **77**, 123-128 (08).
- (10) Fam Le Kien, S. Dutta Gupta, K. Hakuta, “Phonon-mediated decay of an atom in a surface-induced potential”, Phys. Rev. A, **75**, 062904 (07).
- (11) K. P. Nayak, P. N. Melentiev, M. Morinaga, Fam Le Kien, V. I. Balykin, K. Hakuta, “Optical nanofiber as an efficient tool for manipulating and probing atomic fluorescence”, Opt. Express, **15**, 5431-5438 (07).
- (12) Fam Le Kien, S. Dutta Gupta, K. Hakuta, “Optical excitation spectrum of an atom in a surface-induced potential”, Phys. Rev. A, **75**, 032508 (07).
- (13) Fam Le Kien, K. Hakuta, “Spontaneous radiative decay of translational levels of an atom near a dielectric surface”, Phys. Rev. A, **75**, 013423 (07).
- (14) Fam Le Kien, V. I. Balykin, K. Hakuta, “Light-induced force and torque on an atom outside a nanofiber”, Phys. Rev. A, **74**, 033412 (06).
- (15) Fam Le Kien, V. I. Balykin, K. Hakuta, “Angular momentum of light in an optical nanofiber”, Phys. Rev. A, **73**, 053823 (06).
- (16) Fam Le Kien, V. I. Balykin, K. Hakuta, “Scattering of an evanescent probe light field on a single cesium atom near a nanofiber”, Phys. Rev. A, **73**, 013819 (06).

[学会発表] (計 36 件)

国際会議基調/招待講演

- (1) K. Hakuta, “Manipulating Atoms and Photons Using Optical Nanofibers”, 39<sup>th</sup> Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, 4-9 January 2009, (Snowbird, Utah, U. S. A.). Plenary
- (2) K. P. Nayak, Fam Le Kien, K. Hakuta, “Optical Nanofibers for Manipulating Atoms and Photons”, 39<sup>th</sup> Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, 4-9 January 2009, (Snowbird, Utah, U. S. A.).
- (3) Fam Le Kien, K. Hakuta, “Slowing down a guided light field along a nanofiber in a cold atomic gas”, 39<sup>th</sup> Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, 4-9 January 2009, (Snowbird, Utah, U. S. A.).
- (4) K. Hakuta, “Manipulating Atoms and Photons Using Optical Nanofibers”, International Conference on Cold Atoms, 13-15 December 2008, (Kolkata, India). Plenary
- (5) K. Hakuta, “Manipulating and Controlling Atoms and Photons Using Optical Nanofibers”, International Workshop and Photonics and Applications, 10-13 September 2008, (Nha Trang, Vietnam). Plenary
- (6) K. Hakuta, “Manipulating and Controlling Atoms and Photons Using Optical Nanofibers”, International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology (SICE Annual Conference 2008), 21-22 August 2008, (Chofu, Tokyo, Japan). (Special Invited Speech)
- (7) K. Hakuta, “Manipulating Single Atoms and Single Photons Using Optical Nanofibers”, MIT-Harvard CUA Seminar, MIT-Harvard Center for Ultra Cold Atoms, 25 March 2007, (Cambridge, MA, U.S.A.).
- (8) K. Hakuta, “Single Atoms on an Optical Nanofiber: A Novel Work System for Slowing and Freezing Light”, SPIE Photonics West, 19-24 January 2008, (San Jose, California, U.S.A.).
- (9) K. Hakuta, “Single Atoms on an Optical

Nanofiber”, 38th Winter Colloquium on Quantum Electronics, 6-11 January 2008, (Snowbird, Utah, U.S.A.).

- (10) K. Hakuta, “Optical Nanofibers for Manipulating Atoms and Photons”, Slow and Fast Light, 8-11 July, 2007, Salt Lake City, Utah, U. S. A.
  - (11) K. Hakuta, “Optical Nanofibers for Manipulating Single Atoms and Single Photons”, International Symposium on the Recent Progress in Optical Spectroscopy and Its Applications, 7-9 May, 2007, Hong Kong.
  - (12) K. Hakuta, “Optical Nanofibers for Manipulating and Probing Single Atom Fluorescence”, 37th Winter Colloquium on Quantum Electronics, 2-6 January 2007, (Snowbird, Utah, U.S.A.).
  - (13) K. Hakuta, “Optical Nanofibers for Manipulating and Probing Single Atom Fluorescence”, International Conference on Photonics, Hyderabad, India, 10-15 December, 2006; Plenary Talk.
- 国際会議一般講演
- (14) K. P. Nayak, Fam Le Kien, and K. Hakuta, *Single atoms on an Optical Nanofiber*, International Symposium on Quantum-Atom Optics (Wollongong, Australia), 2-6 December, 2007.
  - (15) K. P. Nayak, P. N. Melentiev, M. Morinaga, Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta, *Efficient Probing Of Few Atom Fluorescence through the Guided Mode of an Optical Nanofiber*, CLEO/Pacific Rim 2007 (Seoul, Korea), WG1-1, 26-31 August, 2007.
  - (16) K. P. Nayak, P. N. Melentiev, M. Morinaga, Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta, *Optical nanofiber for manipulating and probing single atom fluorescence*, CLEO/Europe - IQEC 2007 (Munich, Germany), IA2-2, 17-22 June, 2007.
  - (17) Fam Le Kien, S. Dutta Gupta, V. I. Balykin, and K. Hakuta, “Efficient channeling of cesium fluorescence into guided modes of a nanofiber”, LEO/Europe - IQEC 2007 (Munich, Germany), 17-22 June, 2007.
  - (18) K. P. Nayak, S. Inoue, M. Morinaga, V. I. Balykin, Fam Le Kien, and K. Hakuta, “Single Atom as a Light Coupler for a Nanofiber”, Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS2006), 21-26 May, 2006, (San Francisco, U.S.A.).

国内学会／シンポジウム

- (19) 白田耕藏、K. P. Nayak, Fam Le Kien、ナノ光ファイバーによる原子と光子の操作：原子／表面相互作用の新しいプローブ（招待講演）、物理学会春季大会、

2009年3月27日、東京

- (20) 鍛冶一平, 上本真輔, K. P. Nayak, 奥野剛史, 白田耕藏、ナノ光ファイバー表面上の少数個の量子ドットの蛍光観測II、物理学会春季大会、2009年3月27日、東京
- (21) 白崎昭生, Das Manoj, K. P. Nayak, 白田耕藏、ナノ光ファイバー近接場中のセシウム原子のレーザー誘起蛍光スペクトルの観測、物理学会春季大会、2009年3月27日、東京
- (22) K. P. Nayak, Fam Le Kien, K. Hakuta、Investigation of near-surface atoms using an optical nanofiber、物理学会春季大会、2009年3月27日、東京
- (23) Fam Le Kien, S. Dutta Gupta, K. Hakuta、Phonon-mediated decay of an atom in a surface-induced potential、物理学会春季大会、2009年3月27日、東京
- (24) Manoj Das, K. P. Nayak, Fam Le Kien, K. Hakuta、Cavity enhanced nonlinear optics with sub-wavelength diameter optical fiber、電通大/農工大21世紀COEプログラム合同シンポジウム、2008年12月13日 東京
- (25) 鍛冶一平、K. P. Nayak, 森永実、奥野剛史、白田耕藏、ナノ光ファイバー上の単一量子ドットの蛍光の観測、電通大/農工大21世紀COEプログラム合同シンポジウム、2008年12月13日 東京
- (26) 鍛冶一平, K. P. Nayak, 森永実、奥野剛史, 白田耕藏、ナノ光ファイバー近接場領域の少数個の量子ドットの蛍光観測、日本物理学会秋季大会、2008年9月21日、盛岡
- (27) K. P. Nayak, Fam Le Kien, K. Hakuta、Antibunching and bunching in a few atoms resonance fluorescence measured through a nanofiber-II: Effect of excitation and observation geometries、日本物理学会秋季大会、2008年9月21日、盛岡
- (28) Fam Le Kien, V. I. Balykin, K. Hakuta、Angular momentum of light in an optical nanofiber、日本物理学会秋季大会、2008年9月21日、盛岡
- (29) Fam Le Kien, K. Hakuta、Correlations between photons emitted by multiatom fluorescence into a nanofiber、日本物理学会春季年会、2008年3月23-26日 大阪
- (30) K. P. Nayak, Fam Le Kien, K. Hakuta、Antibunching and bunching in a few atoms resonance fluorescence measured through a nanofiber、日本物理学会春季年会、2008年3月23-26日 大阪

- (31) M. Das, K. P. Nayak, Fam Le Kien, K. Hakuta, Evanescent field absorption spectroscopy of a few atoms around an optical nanofiber - I、日本物理学会春季年会、2008年3月23-26日 大阪
- (32) Fam Le Kien, K. P. Nayak, K. Hakuta, ナノ光ファイバー上の1次元配列原子群による超放射制御(理論)、日本物理学会秋季年会、2007年9月21-24日、札幌
- (33) K. P. Nayak, K. Hakuta、Single Atoms on an Optical Nanofiber I: Photon Correlation Measurements、日本物理学会秋季年会、2007年9月21-24日、札幌
- (34) Kali Nayak, Manoj Das, Fam Le Kien, K. Hakuta、Optical Nanofibers for Manipulating and Probing Single Atom Fluorescence、日本物理学会春季年会、2007年3月18-20日、鹿児島
- (35) K.P. Nayak, M. Das, 白田耕蔵、ナノ光ファイバによる冷却原子とシリカ表面の相互作用、日本物理学会春季年会、2007年3月18-20日、鹿児島
- (36) Kali Nayak , Manoj Das , M. Morinaga , V. I. Balykin, Fam Le Kien, K. Hakuta、Optical Nanofiber as an Efficient Tool for Exploring Atom-Surface Interaction : Towards Manipulation of Atoms and Photons using Optical Nanofibers、日本物理学会秋季年会、2006年9月23-26日、千葉

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

雑誌論文(4)はNew Journal of Physics 誌(ヨーロッパ物理学会電子ジャーナル)の2008年度のBest Paper (Nanoscale Physics 分野の4編の内の1編)に選ばれた。

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

白田 耕蔵 (HAKUTA KOHZO)  
電気通信大学・電気通信学部・教授  
研究者番号:80164771

### (2)研究分担者

ファミ レ キエン (FAM LE KIEN)  
電気通信大学・電気通信学部・准教授  
研究者番号:50377024  
森永 実 (MORINAGA MAKOTO)  
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・助教

研究者番号:60230140

(3)連携研究者  
なし