

冷却原子を用いた量子光学

高橋 義朗

本解説ではレーザー冷却原子を用いて行われた量子光学実験¹⁾について解説する。まず最初に、以下で紹介する実験に共通する、冷却原子を用いた量子光学実験の利点をまとめてみる。

(1) ドップラー広がりが無視できる

ドップラー広がりや衝突広がり自然幅（アルカリ原子で数 MHz 程度）よりも十分小さく完全に無視することができるレーザー冷却原子は、理想的な“均一系”である。原子ビームを用いることにより、横ドップラー広がり小さくできるものの、完全に無視できるところまで抑えることはなかなか難しい。冷却原子系では、離調を自然幅程度にまで小さくとれ、したがって大きな非線形性が得られ、また簡単に離調の関数として測定を行うことができる。

(2) 相互作用時間が長い

レーザー冷却原子は、磁気光学トラップ²⁾等により数 cm/s まで減速可能である。したがって、小さい相互作用領域でも、長い相互作用時間が得られる。たとえば、30 μm の mode waist をもつ光共振器中に原子がどのくらいの間滞在できるか、を考えてみる。1 km/s の原子ビームでは 30 ns であり原子の放射寿命と同程度になってしまう。10 cm/s のレーザー冷却原子では、300 μs となり十分長い。また、磁気光学トラップでは数分のトラップ寿命は比較的容易に得られ、原子を長時間観測し続けることが可能になる。

(3) 高密度である

磁気光学トラップされた原子の数はたかだか $10^8 \sim 10^{10}$ 個であり、これはたとえば分光実験でよく使われる常温 Cs 原子の分光用ガラスセル 1 cm^3 中に存在する原子数よりも少ない。しかし、磁気光学トラップされた原子団の大きさ

は数百 μm から数 mm と小さく、 $10^{10} \sim 10^{12}/\text{cm}^3$ という高密度が得られている。さらに、(1) で述べたとおり、レーザー冷却原子にはドップラー広がりがないため光学濃度は非常に高く dark 磁気光学トラップ³⁾で 160 という値が達成されている。また、アルカリ原子のボーズ・アインシュタイン凝縮体 (BEC) では、原子数は最大 10^7 個程度で $10^{14}/\text{cm}^3$ という高密度が得られており、光学濃度は 300 にもなる。また、凝縮体を光双極子トラップすることで $10^{15}/\text{cm}^3$ というさらなる高密度も得られている⁴⁾。特に最近、Hau らはボーズ凝縮の臨界温度前後の、蒸発冷却された極低温高密度原子団を用いて electromagnetically-induced transparency (EIT) を行い、このような高密度な媒質中では光の群速度が 17 m/s まで遅くなることを報告している⁵⁾。図 1 にパルス遅延のデータを示す。また非常に大きな非線形屈折率が得られており、冷却原子系の量子光学への応用に大きな刺激となっている。

本解説では、スキーズド光や量子非破壊測定等の光の量子的性質に関係した研究や、少数個原子の共振器中での光学的振る舞いなどの、狭い意味での量子光学に限定して、冷却原子を用いた量子光学実験の解説を行うことにする。広い意味での量子光学に含まれる興味深い研究については、ここで簡単に触れておくことにしよう。まず磁気光学トラップされた原子は、トラップ光により強くドレスされた状態であり、光と原子の相互作用を研究するのに適した系となっている。プローブ光の透過スペクトルは、増幅も含めた興味深いスペクトルが得られる⁶⁻¹¹⁾。また、冷却原子を利得媒質としたレーザー発振も観測されている¹²⁾。さらに、不均一広がりや位相緩和のない均一な系での光領域 free-induction decay 信号の観測¹³⁾も含めて、さまざまな非線形光学実験⁶⁻¹²⁾が行われている。特に、光永らは EIT や electromagnetically-induced grating (EIG) を観

京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)
E-mail: yitk@scphys.kyoto-u.ac.jp

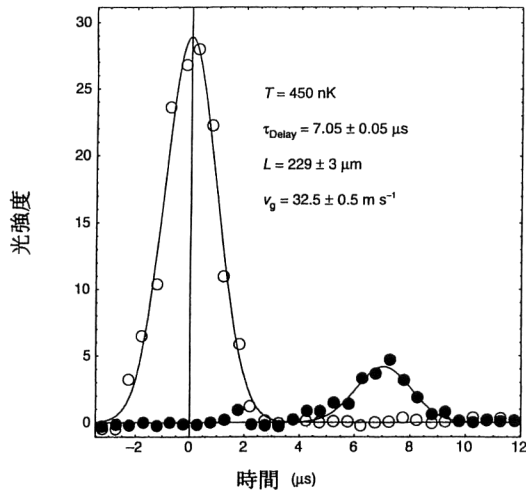


図1 冷却Na原子を伝搬するパルスの遅延測定結果. ○は原子がないとき, ●が原子のあるとき. このデータは光速が32 m/sになっていることを示している.

測している^{9,11)}. また過渡的の四光波混合の信号を観測し, これが冷却原子の温度測定の新しい方法になっていることを示した¹⁰⁾.

1. 冷却原子を用いたスキージングおよび量子非破壊測定の実験

光のスキージングは, 量子光学において非常に発展した分野のひとつである. Lambrecht らはレーザー冷却Cs原子を用いて直交位相スキーズド光を発生させた¹⁴⁾. 25 cmの長さの光共振器を, レーザー冷却用のガラスセルの外部に配置し, プローブ光を入射させその共振器からの反射光(信号光)とプローブ光の一部(参照光)をホモダイン検出した. この光共振器は, 原子の自然幅よりも共振器の線幅のほうが広い, いわゆる bad cavity になっている. 図2 (a)に彼らの実験配置を示す. これにより, ショットノイズレベルに比べて約40%のノイズの減少を得ている. この値はトラップ光を切った状態で得られたものであり, 原子が共振器から逃げていくまでの一時的なスキージングになっている. 連続的に安定なスキージングを得るために, 弱いトラップ光を入れた状態でも実験が行われ, 約20%のノイズの減少が得られている. 図2 (b)にそのデータを示す. 彼らは最近この系の詳しい理論的取り扱いを行っている¹⁵⁾.

ここで, スキーズド光を用いて冷却原子の分光を行った例を紹介しておく. いまや比較的容易に非古典的な光源を得ることができるようになってきている. 特に最近, 連続出力で波長可変光パラメトリック発振器(OPO)の技術が進歩し, この分野の研究の発展を促進している. Kimbleのグループは, 冷却Cs原子を対象に, このOPOからの量子

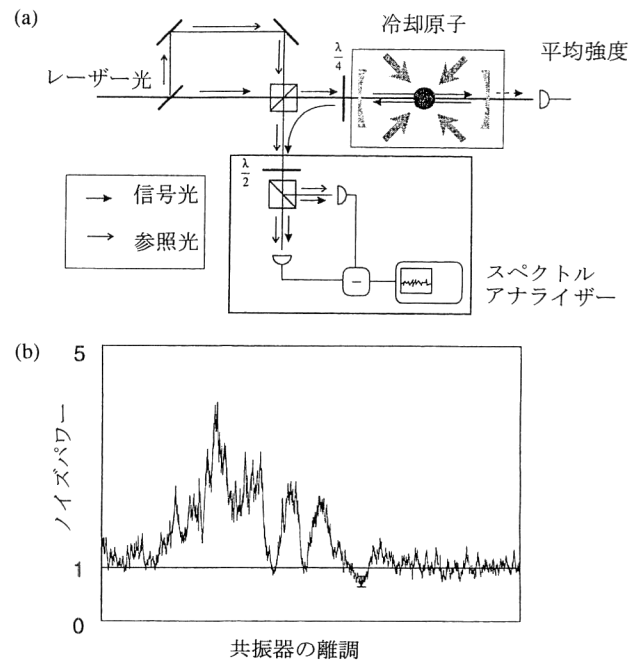


図2 冷却Cs原子を用いたスキーズド光の発生実験. (a)はその実験配置図. (b)はスペクトラムアナライザーの5 MHz成分の測定結果.

相関をもった光子対による2光子励起実験を行った¹⁶⁾. Ti:sapphireレーザー(884 nm)の第2高調波(442 nm)でOPOを励起し閾値以下で動作させ, 852 nm (Csの $6S_{1/2}F=4-6P_{3/2}F=5$ 遷移に共鳴)と917 nm ($6P_{3/2}F=5-6D_{5/2}F=6$ 遷移に共鳴)のシグナル光とアイドラ光を発生させた. これを磁気光学トラップされたCs原子に加え励起強度依存性を測定し, コヒーレント光による励起の場合との明瞭な違いを観測している. 最近, 彼らは, この系の詳しい理論的取り扱い¹⁷⁾や非線形混合器¹⁸⁾としての応用等の研究を行っている.

光のスキージングとともに光の量子非破壊測定も量子光学の重要な概念である. 量子非破壊測定自体は, 測定器系の被測定系への反作用を回避する方法として導入された概念であるが, 主に対象を光とした量子光学の問題として発展している. 最近レーザー冷却原子を用いて, 量子非破壊測定が行われた¹⁹⁾. Rochらは, 真空容器中に約65 mmの長さの光共振器を配置し, 共振器の中心でRb原子のdark磁気光学トラップを行った. そこにRbの $5S_{1/2}F=2-5P_{1/2}F=2$ 遷移の共鳴周波数付近の信号光を加えて, これによるライトシフトを $5S_{1/2}F=1-5P_{1/2}F=2$ 遷移の赤方に離調した測定光により測定している. 信号光と測定光の偏光は直交しており, それらの共振器からの反射光は独立に検出(信号光は直接検出, 測定光はホモダイン検出)でき, この実験で非常によい信号光と測定光の相関の結果が

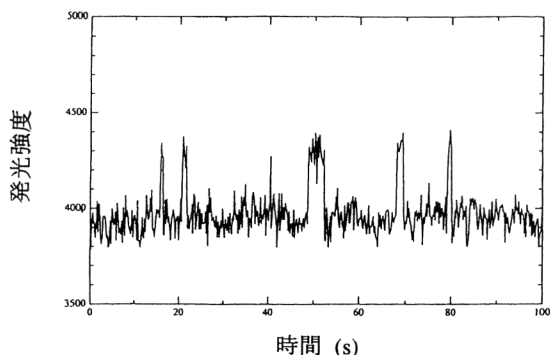


図3 超低密度トラップからの冷却Cs原子の発光信号の時間変化。

得られている。

2. 単一冷却原子の実験

単一または少数個の原子またはイオンを実時間で観測し続けることは、集団平均することなく量子系を観測することになりきわめて興味深い。特に最近急速に注目を集めている量子計算機等の量子情報処理への応用上も大変重要である。また、発光された光は古典的なバンド光ではなくアンチバンチングを示す。このような少数量子系の発光はいわゆる量子跳躍を示し、イオントラップや有機結晶においても観測されるようになった。

Hu と Kimble は、このような単一原子の実験が中性原子の磁気光学トラップでも可能であることを示した²⁰⁾。彼らは真空容器内のCs原子の圧力を下げ、磁気光学トラップされた1つのCs原子の発光を観測することに成功している。図3に信号の例を示す。1つのCs原子が磁気光学トラップに捕捉されると、発光量が1原子分増大し、トラップから逃げると発光量が1原子分減少することが明瞭に現れている。また最近 Meschede らは、磁気光学トラップ中の少数個のCs原子のダイナミクスを詳しく調べている²¹⁾。

3. 冷却原子を用いた共振器量子電磁気学実験

教科書でまず取り上げられる、原子と光の相互作用というのは、単一の孤立した2準位原子と、光共振器中の単一モードの光との相互作用 (Jaynes-Cummings モデル) である²²⁾。最近の高品質ミラーの開発により、思考実験の枠を超えて、この教科書に出てくるような理想的な系を実験室で実現することができるようになってきた。いわゆる強結合領域では、原子と共振器のモードとの間で単一量子を交換しあう (Rabi 振動) 周期が、原子の放射寿命や共振器中の場の減衰時間よりも短く、非常に興味深い共振器量子

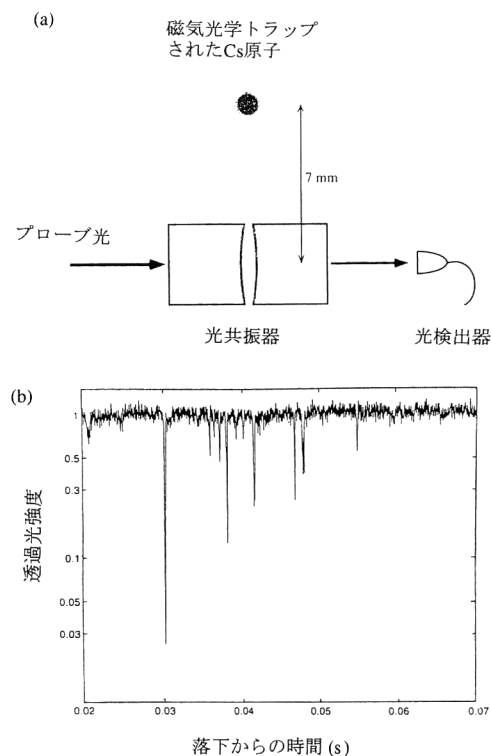


図4 冷却Cs原子の共振器量子電磁気学実験。(a)はその実験配置図。(b)は共振器の透過光強度の時間変化。

電磁気学 (cavity QED) 効果が表れる。レーザー冷却された原子を用いることにより、共振器内での原子の滞在時間を長くし、実時間で個々の原子が共振器を通過するのを観測することができるようになった。

Mabuchi らは、初めてレーザー冷却Cs原子を用いて cavity QED 実験を行った²³⁾。図4(a)に彼らの実験配置図を示す。まず、磁気光学トラップで原子を集めそれを7 mm 下方の高フィネスのファブリー・ペロー共振器に落とした。この共振器の共鳴周波数は、原子の共鳴周波数に一致するよう帰還が施してあり、またこれに共鳴したプローブレーザー光が入射されていて、共振器の透過光をモニターしている。原子が共振器を透過するにつれ透過光が減少しこれにより個々の原子の到着を実時間で検出している。図4(b)にこの様子が示されている。その後、Kimble らのグループは、同様の実験装置で、共振器内の平均光子数が1以下の状況で、真空 Rabi 分裂に起因した力が原子に及ぼされていることを実験的に確認した²⁴⁾。こういった力を原子の冷却²⁵⁾、トラップ²⁶⁾、および反射²⁷⁾に応用することが議論されている。また、最近 Rempe らのグループは、Rb原子を原子泉法により25 cm 上方に置かれた高フィネスのファブリー・ペロー共振器中に移動させ、同様の透過光信号を観測している²⁸⁾。

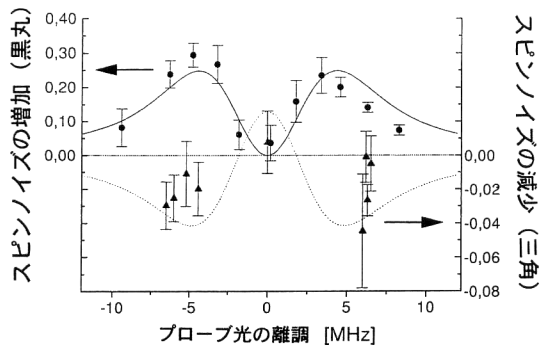


図5 冷却Cs原子のスピノイズの測定結果。プローブ光の偏光変化を平衡型検出器で検出し、スペクトラムアナライザーを用いて1.9 MHz成分のみを取り出して出力としている。▲はスクイーズした真空の位相がコヒーレント光と同位相の場合。●は位相が90度ずれている場合。縦軸の0が、スクイーズした真空を入れていない場合のスピノイズレベルである。横軸はプローブ光の離調である。実線および点線は実験データの理論モデルによるフィッティング曲線である。

4. 冷却原子スピンのスクイーズド状態

以上は、冷却原子を使った量子光学実験であったが、冷却原子と光の相互作用により、原子（特にスピン）の状態を、古典的な Bloch 状態（光のコヒーレント状態のスピン版）から、北川と上田が定式化した非古典的なスクイーズドスピン状態（光のスクイーズド状態のスピン版）²⁹を生成する試みが提案されている。Kuzmichらはスクイーズド光とコヒーレント光を組み合わせて冷却原子に加えることにより、スクイーズドスピン状態が生成されることを理論的に示した³⁰。また、冷却原子のスピンの Faraday 回転を測定することによりスピンの量子非破壊測定を行い、これによりスクイーズドスピン状態を生成し時間反転対称性の破れなどのさまざまな精密測定に応用しようという提案もされている^{31,32}。この方向の実験として Sorensen らは、レーザー冷却された原子スピンのもつゆらぎの観測に成功した³³。不確定性関係により、 N 個のスピンのもつ量子ゆらぎは、 $N^{1/2}$ である。彼らは直線偏光したコヒーレント光とそれに垂直に偏光したスクイーズした真空を冷却原子に入射して、期待される $N^{1/2}$ 依存性を実験的に確かめている。そしてごく最近、ついに同じグループの Hald らは Kuzmich らの提案した実験を行い、スクイーズドスピン状態の生成に成功したことを報告している³⁴。図5に彼らのデータを示す。プローブ光の偏光変化を平衡型検出器で検出し、スペクトラムアナライザーを用いて1.9 MHz成分のみを取り出して出力としている。縦軸の0が、スクイーズした真空を入れていない場合のスピノイズレベルである。スクイーズした真空の位相を調節することにより、スピンの量子ゆらぎの減少および増加をプローブ光の離調の

関数として観測している。スクイーズドスピン状態は多原子系のエンタングルド状態であり、量子情報処理の面からも大変興味深いものである。

また、2つの独立な BEC を用いて、分光または原子干渉計の精度を、ハイゼンベルグ限界 ($1/N$) にまで向上させる提案がなされているが³⁵、これは実は2つの独立な BEC がスクイーズドスピン状態の一種の Dicke 状態に対応する、ということが本質である。

以上、レーザー冷却原子を用いた量子光学実験について簡単に概観してきた。興味深い実験がこれまで行われてきているが、レーザー冷却の分野全体から見るとその量はあまり多いとはいえないように思われる。また、使われているレーザー冷却技術も磁気光学トラップがほとんどでありあまりバリエーションがあるとはいえない。たとえば、光双極子トラップや光格子等の技術や原子光学との組み合わせ、BEC を対象にした量子光学実験などいろいろな面白い研究が行えるのではないだろうか。

文 献

- 1) 松岡正浩：量子光学（東京大学出版会，東京，1996）。
- 2) E. L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu and D. E. Prichard: "Trapping of neutral atoms with radiation pressure," *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1987) 2631-2634.
- 3) W. Ketterle, K. B. Davis, M. A. Joffe, A. Martin and D. E. Prichard: "High densities of cold atoms in a dark spontaneous-force optical trap," *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993) 2253-2256.
- 4) D. M. Stamper-Kurn, M. R. Andrews, A. P. Chikkatur, S. Inouye, H.-J. Miesner, J. Stenger and W. Ketterle: "Optical confinement of a Bose-Einstein condensate," *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998) 2027-2030.
- 5) L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton and C. H. Behroozi: "Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas," *Nature*, **397** (1999) 594-598.
- 6) D. Grison, B. Lounis, C. Salomon, J. Y. Courtois and G. Grynberg: "Raman spectroscopy of cesium atoms in a laser trap," *Europhys. Lett.*, **15** (1991) 149-154.
- 7) J. W. R. Tabosa, G. Chen, Z. Hu, R. B. Lee and H. J. Kimble: "Nonlinear spectroscopy of cold atoms in a spontaneous-force optical trap," *Phys. Rev. Lett.*, **66** (1991) 3245-3248.
- 8) Y. Torii, N. Shiokawa, Y. Matsuo, T. Hirano and T. Kuga: "Spectroscopic properties of cold rubidium atoms in a magneto-optic trap," *Prog. Cryst. Growth Charact. Matter*, **33** (1996) 413-418.
- 9) M. Mitsunaga, T. Mukai, K. Watanabe and T. Mukai: "Dressed-atom spectroscopy of cold Cs atoms," *J. Opt. Soc. Am. B*, **13** (1996) 2696-2770.
- 10) M. Mitsunaga, M. Yamashita, M. Koashi and N. Imoto: "Temperature diagnostics for cold sodium atoms by transient four-wave mixing," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 840-842.

- 11) M. Mitsunaga and N. Imoto: "Observation of an electromagnetically induced grating in cold sodium atoms," *Phys. Rev. A*, **59** (1999) 4773-4776.
- 12) L. Hilico, C. Fabre and E. Giacobino: "Operation of «cold-atom laser» in a magneto-optical trap," *Europhys. Lett.*, **18** (1992) 685-688.
- 13) K. Toyoda, Y. Takahashi, K. Ishikawa and T. Yabuzaki: "Optical free-induction decay of laser-cooled ^{85}Rb ," *Phys. Rev. A*, **56** (1997) 1564-1568.
- 14) A. Lambrecht, T. Coudreau, A. M. Steinberg and E. Giacobino: "Squeezing with cold atoms," *Europhys. Lett.*, **36** (1996) 93-98.
- 15) A. Z. Khoury, T. Coudreau, C. Fabre and E. Giacobino: "Three-level approach to squeezing with cold atoms," *Phys. Rev. A*, **57** (1998) 4770-4777.
- 16) N. Ph. Georgiades, E. S. Polzik, K. Edamatsu and H. J. Kimble: "Nonclassical excitation for atoms in a squeezed vacuum," *Phys. Rev. Lett.*, **75** (1995) 3426-3429.
- 17) N. Ph. Georgiades, E. S. Polzik and H. J. Kimble: "Quantum interference in two-photon excitation with squeezed and coherent fields," *Phys. Rev. A*, **59** (1999) 676-690.
- 18) N. Ph. Georgiades, E. S. Polzik, and H. J. Kimble: "Atoms as nonlinear mixers for detection of quantum correlations at ultrahigh frequencies," *Phys. Rev. A*, **55** (1997) R1605-R1608.
- 19) J.-F. Roch, K. Vigneron, Ph. Grelu, A. Sinatra, J.-Ph. Poizat and Ph. Grangier: "Quantum nondemolition measurements using cold trapped atoms," *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997) 634-637.
- 20) Z. Hu and H. J. Kimble: "Observation of a single atom in a magneto-optical trap," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 1888-1890.
- 21) D. Meschede, B. Ueberholz, V. Gomer, S. Knappe, U. Reiter, H. Schadwinkel and F. Strauch: "Single atoms in a MOT," *Atomic Physics 16*, eds. W. E. Baylis and G. W. F. Drake (AIP, New York, 1999) pp. 118-131.
- 22) D. F. Walls and G. J. Milburn: *Quantum Optics* (Springer, New York, 1994).
- 23) H. Mabuchi, Q. A. Turchette, M. S. Chapman and H. J. Kimble: "Real-time detection of individual atoms falling through a high-finesse optical cavity," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1393-1395.
- 24) C. J. Hood, M. S. Chapman, T. W. Lynn and H. J. Kimble: "Real-time cavity QED with single atoms," *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998) 4157-4160.
- 25) P. Horak, G. Hechenblaikner, K. M. Gheri, H. Stecher and H. Ritsch: "Cavity-induced atom cooling in the strong coupling regime," *Phys. Rev. Lett.*, **79** (1997) 4974-4977.
- 26) S. Haroche, M. Brune and J. M. Raimond: "Trapping atoms by the vacuum field in a cavity," *Europhys. Lett.*, **14** (1991) 19-24.
- 27) B.-G. Englert, J. Schwinger, A. O. Barut and M. O. Scully: "Reflecting slow atoms from a micromaser field," *Europhys. Lett.*, **14** (1991) 25-31.
- 28) P. Munstermann, T. Fischer, P. W. H. Pinkse and G. Rempe: "Single slow atoms from an atomic fountain observed in a high-finesse optical cavity," *Opt. Comm.*, **159** (1999) 63-67.
- 29) M. Kitagawa and M. Ueda: "Squeezed spin states," *Phys. Rev. A*, **47** (1993) 5138-5143.
- 30) A. Kuzmich, K. Molmer and E. S. Polzik: "Spin squeezing in an ensemble of atoms illuminated with squeezed light," *Phys. Rev. Lett.*, **79** (1997) 4782-4785.
- 31) Y. Takahashi, K. Honda, N. Tanaka, K. Toyoda, K. Ishikawa and T. Yabuzaki: "Quantum nondemolition measurement of spin via the paramagnetic Faraday rotation," *Phys. Rev. A*, 1999 (in press).
- 32) A. Kuzmich, N. P. Bigelow and L. Mandel: "Atomic quantum non-demolition measurements and squeezing," *Europhys. Lett.*, **42** (1998) 481-486.
- 33) J. L. Sorensen, J. Hald and E. S. Polzik: "Quantum noise of an atomic spin polarization measurement," *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998) 3487-3490.
- 34) J. Hald, J. L. Sorensen, C. Schori and E. S. Polzik: "Spin squeezed atoms: A macroscopic entangled ensemble created by light," *Phys. Rev. Lett.*, **83** (1999) 1319-1322.
- 35) P. Bouyer and M. Kasevich: "Heisenberg-limit spectroscopy with degenerate Bose-Einstein gases," *Phys. Rev. A*, **56** (1997) R1083-R1086.

(1999年7月7日受理)