

# 量子場操作

清水 明 (東京大学大学院総合文化研究科)

主要成果は、ボーズ・アインシュタイン凝縮体のマッハツェンダー干渉計、原子波のコヒーレント増幅、原子ホログラフィー、多原子相関の測定、量子反射現象の観測、新しい量子暗号通信の方式の提案と実証実験、微細な発光ダイオードからの広帯域微弱サブポアソン光の発生、量子縮退励起子分子波の生成、半導体励起子共鳴での非線形光学応答の原理の解明、引力相互作用する凝縮体の理論、ミクロ物理学からマクロ物理学へのつながりの理論、等である。

## Manipulation of Quantum Fields

Akira Shimizu (University of Tokyo)

Our achievements include: interferometers of Bose-Einstein condensates, coherent amplification of atomic waves, atom holography, observation of multi-atom correlations, observation of quantum reflections, proposal and experiment of a new quantum cryptography, generation of wide-range weak sub-Poissonian light from a micro LED, mechanism of nonlinear optical responses due to excitons, theories of condensates, microscopic theories of classicality of macroscopic quantum systems, and so on.

1. 研究テーマ

「量子場操作」

研究代表者：清水明（東京大学大学院 総合文化研究科）

## 2. 研究の概要

極微細構造を持つ系において、電子と光子の両方がその量子性を顕著に示すような現象を探索し、かつ、そのような現象が起こる極微細構造を明確な意図を持って設計し、人工的に創生することを目標にしている。具体的な研究テーマは、次の4つに大別される:A. 量子場レーザー・原子波レーザー、B. 少数光子光非線形、C. 微細発光ダイオードにおける光子場制御、D. 基礎理論の確立・新しい可能性の理論的検討。これを、いくつかのグループごとに担当したが、相互に協力しあいながら研究を進めたので、グループ分けは便宜的なものである。以下では、研究室別に、詳しく報告する。概ね、満足できる成果が出せたと考えている。

清水研(清水明):

- (1) 有限体積の開いた量子系の安定性と古典化に関する理論: まず、相互作用するボゾン系の基底状態として従来考えられてきた状態は、ほとんどが環境に対して脆弱(fragile)であり、環境に対して頑丈(robust)な唯一の純粋状態は、我々が発見して CSIB と名付けたものだけであることを示した。次に、この robust であるか、fragile であるかということが、環境と切り離された閉じた系の波動関数の静的な性質である、マクロ変数の量子揺らぎの大小と対応していることを示した。さらに、この対応が、一般の物理系でも成立することを示した。この結果は、原理的な重要性はもとより、応用上も、量子計算機に使われる量子状態の安定性の評価などへも適用できる可能性がある。
- (2) 電子・正孔凝縮系に、電子をドープすることにより、電子・正孔相関と電子・電子(超伝導)相関が共存し、前者が後者を大幅に増強する、という新しい相を発見した。
- (3) メソスコピック系の輸送現象を考察し、開いた系の非平衡統計物理学の問題点を明らかにし、それを克服する定式化を提出した。
- (4) 量子系の測定には、交換関係からくる限界以外にも、物理的相互作用が4つしかないことからくる原理的限界があることを明らかにし、それが、制御限界などをもたらすことを指摘した。
- (5) 物質中の光の量子効果について、動的カシミール効果、吸収性媒質中の原子の自然放出寿命、LED の光子統計を解析し、従来の理論の誤りを指摘して、正しい結論を導き出した。
- (6) 電子溜りと結合した電子系の超放射現象には、特徴的な振動が現れることを指摘した。
- (7) 励起子の有効相互作用を導き出すのに、繰り込み効果が本質的であることを示した。
- (8) 強相関係の非線形光学応答について、ポンプ光の寄与を繰り込んで扱う方法を提案した。

久我研(久我隆弘):

96年の発足当初の研究目的は、「原子気体のボーズ凝縮(BEC)」と「光・原子相互作用における共振器効果(cavity QED)」の2本立てであった。

BEC に関しては98年暮れに Rb 原子を用いて日本で初めての BEC を実現できた。米国での実現(95年)から3年も遅れてしまったのは、当初は独自の方式を採用していたためである。諸般の状況から98年に方針転換してからは比較的速いテンポで BEC の実現にこぎつけた。その後は、99年には原子波をコヒーレントに増幅することに世界で初めて成功し、物理学会の総合講演や海外の主要会議(複数)で招待講演を依頼されるなど、大きな話題を提供できた。

cavity QED に関しては、99年暮れ、フィネスが  $10^5$  程度の高 Q 値微小光共振器内に1個の原子が入ったことを示す信号を数個の光子で観測することに成功した。2000年には共振器内にある数個の原子による光パルス(共振器内平均光子数は数個程度)伝播の遅延や先進効果の観測に成功している。また将来的には1個の原子で光パルス伝播の制御が可能であることも示し、これは量子ゲート(量子計算機)の作成にとっては基本的な技術となる。

清水富士夫研(清水富士夫):

1. 原子ホログラフィーの高度化 原子ホログラフィーは我々が開発した原子操作の最も汎用的な技術である。通常の光の計算機ホログラフィーと同じように二値化された窒化シリコン膜を通過した低速原子の回折・干渉により任意の原子のパターンを描くことが出来る。我々は、今回、より分解能が高く、かつグレートーンの原子像を作ることに成功した。
2. 実時間電場制御原子ホログラム 中性原子は2次のシュタルク効果を利用して電場によって原子はの位相を変えることが出来る。我々は窒化シリコン薄膜ホログラム上に平行電極を蒸着し、膜の穴を通過する原子に電場をかけて位相を変調し、原理的に実時間でスクリーン上の原子パターンを制御する方法を開発した。
3. 電場による制御は精度を上げることが容易で汎用性のある粒子制御法であるが、空中に電場極大の点を作れないため、凸レンズを作れないと一般に信じられ、中性粒子光学に応用されることはまれであった。我々は光軸に垂直な2軸で曲率が等しく符号が反対の静電場レンズを3個組み合わせることで回転対称な凸レンズを作れることを初めて実証した。
4. 粒子波光学部品では安定性、波長依存性等で様々な問題を生じ、光学機器に匹敵する高精度なデバイスは開発されていない。しかし、光学部品と同様なことを中性原子波で行うことが全く不可能なわけではない。十数年前から、固体表面の量子反射の存在が議論されている。これは、ファンデルワールスポテンシャルの固体表面での急峻な変化によって原子波が表面から波長の数分の一離れた距離で反射される現象である。非常に低速の原子が必要であるため、今まで実証されたことはなかったが我々はレーザー冷却した準安定状態ネオンを使って初めて固体表面からの量子反射を観測し、かつ定量的な議論を行った。これは、より汎用性の高い高精度原子光学部品開発への道を開くものである。

山西・角屋研(山西正道・角屋豊):「微細発光ダイオードにおける光子場制御」

本研究項目では精密に設計した発光ダイオードにおける光子場制御の研究、特に光子数の少ない領域(微弱・広帯域)でのサブポアソン光発生および電子系・光子強結合系に関する研究を行った。得られた成果は以下の通りである。

- (1)広帯域、微弱サブポアソン光発生:a) ショットノイズ抑制(サブポアソン化)の遮断周波数を理論および実験的に詳細に調べ、pn 接合の微視的・動的なキャリア移動を考慮した一般的な形で定式化した。b)高ドープ分離ヘテロ接合(SCH)を活性層にもつ発光ダイオードを提案した。面積を低減した素子に適用し、検出光電流 40・A で遮断周波数 1GHz の微弱・広帯域サブポアソン光発生を実現した(従来の報告よりも2桁以上の少数光子化)。
- (2)定電圧源駆動におけるサブポアソン光発生:a)発光ダイオードを多重連結することによる定電圧源駆動下でのサブポアソン光発生を実験・理論的に調べるとともに、多重トンネル接合素子による電流雑音抑制を実証した。b)従来の物理機構とは全く異なるバックワードポンプ過程を考慮することで、従来不可能と思われていた単一ダイオード・定電圧源駆動下でのサブポアソン光発生を初めて提案かつ実証した。c)双子の光子対を制御されたタイミングで発生させ得るターンスタイル発光素子を提案した。
- (3)励起子・光子強結合系からの THz 帯電磁波放射:a)共鳴励起した励起子・光子強結合系における励起子数の脈動から THz 帯電磁波が放射されることを実証した。b)励起子・光子強結合系を用いた量子ビット、制御 NOT 動作、位相シフタの実現方式を提案した。

平野研(平野琢也):

(研究項目 A)[原子のボーズ凝縮]

低速原子線を発生する方法を考案し(特許出願)、ボーズ凝縮の生成に必要な時間を大幅に短縮することができた。また、全スピンの2の状態にあるルビジウム原子のボーズ凝縮体を光だけでトラップすることに初めて成功した。

(研究項目C)[量子暗号通信]

微弱な光の検出に平衡型ホモダイン法を用いる量子暗号を考案し、特許の出願、実証実験、盗聴に対する安全性に関する理論的な評価を行った。実証実験では、長さが1kmのファイバーを使って、ランダムなビット列(情報を暗号化する鍵として用いる)を実際に伝送することができた。実証実験、理論的な評価を通して、ホモダイン検出を用いる量子暗号が、高い検出効率を実現できること、盗聴に対して安全であることを示すことができた。

(研究項目C)[面発光レーザーを用いた光子場操作]

外部共振器を用いることにより、面発光レーザーの雑音を低減できることを明らかにした。

五神(五神真):

光を量子レベルで操作する方法を明らかにするために、次の三つの研究を進めた。1)微小球共振器を用いた光波操作法2)半導体の励起子系の非線形光学応答の増強原理の解明、3)ボース縮退した励起子分子波の生成法とそれを用いた光子場操作法の検討。

1)では、まず高い非線形性を示す事で知られる、CuCl結晶を溶融し、微小球共振器を形成する方法を見いだした。これにより、球形共振器におけるポラリトンモードでのレーザー発振を実証した。次に、球径を厳密に選別した直径5ミクロン以下の微小球を連結させ、WGモードを共鳴的に結合させることを試みた。2つの球が連結してできる光の分子状態、一次元配列球によるフォトリックバンド形成を実証した。

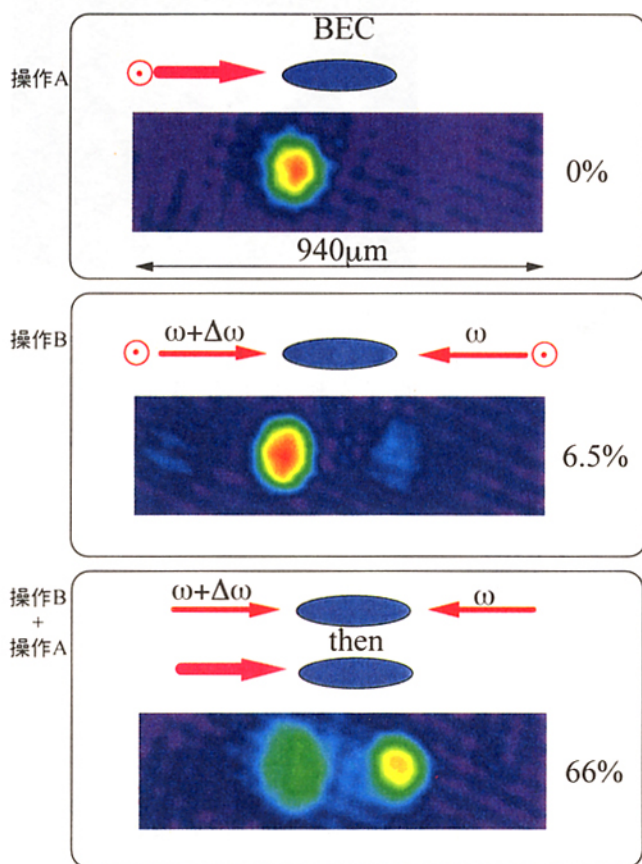
2)では、半導体励起子系の共鳴非線形光学応答について実験と理論解析を系統的に行い、非線形光学応答を支配する要因を明らかにした。励起子を相互作用するボゾン系として扱うとボゾン間の2体の相互作用により、3次の非線形光学応答が記述できることを示した。これに基づき、励起子間の非調和エネルギーを定量的に評価するスキームを与え、実際に実験を行いその評価を行なった。

3)半導体の励起子や励起子分子は低密度の場合にはボゾンとして振る舞うが有限の寿命をもつために、冷却して縮退ボースガスを用意することは通常困難である。ここでは、フェムト秒パルスによる二光子共鳴励起法により、フェムト秒パルスの光子群の位相空間密度を3桁圧縮し、量子縮重度の高い励起子分子波を直接生成できることを実証した。この縮退励起子分子系はボース粒子集団を用いた量子もつれ状態の利用という観点から注目される系である。またこのコヒーレント励起子分子波は高効率の光パラメトリック増幅効果を示すことを見だし、光の量子場操作にも活用できることを示した。

上田研(上田正仁):

CREST研究発足当初は少数光子状態の人工制御に関する理論的研究を行い、その後、レーザー冷却された中性原子気体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)の研究に主力を注いだ。この他に、量子ドットの準位統計及び量子計算の誤り訂正に関する基礎的研究も行った。ここでは、BECの研究について述べる。我々は引力相互作用をするBECに関してどんなユニークな物理が現れるかを明らかにすることを目指して研究を進めてきた。引力相互作用をするボース粒子系は一様な系ではBECを起こさない事が知られているが、最近、レーザー冷却技術を用いてこれを空間的に閉じ込めることにより気体相でBECを発生させる実験が成功した。これは、見かけ上、引力相互作用をするボース粒子も安定なBECを形成するかに思えるが、引力相互作用をするボース粒子系の真の基底状態は固体相にあるので、気体相のBECは準安定状態でしかなく、ついには崩壊する運命にある。我々はこの系が崩壊するメカニズムを研究し、臨界点近傍で原子集団が巨視的量子トンネリング(MQT)を起こして崩壊することを理論的に予言した。また、斥力系で確立されている循環の量子化が引力系では部分的にしか起こらないことを理論的に明らかにした。循環の量子化は超流動現象の極印として知られており、それが引力系においては部分的に破れていることを明らかにしたことは、超流動現象の本質の理解に新たな洞察を加えたと考えられる。さらに、斥力系で用意された大きなBECをフェッパツハ効果により相互作用を突然引力に変えると様々な非線形パターンが現れることを見出した。これらの研究の実験的検証は現在、ライス大学とJILAによってなされている。

### 3. 主要成果の図表による説明

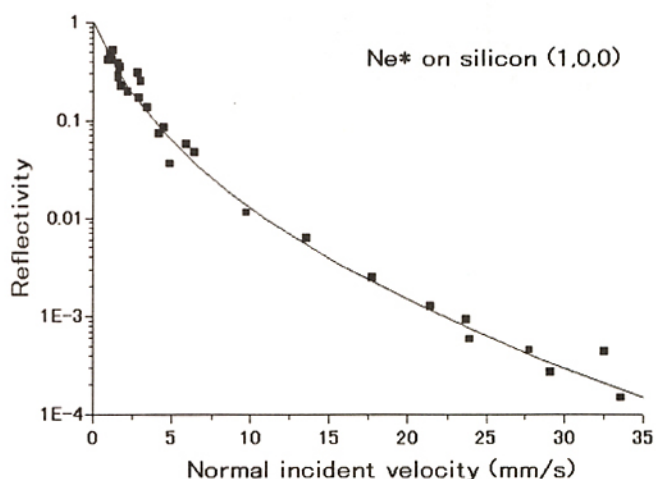
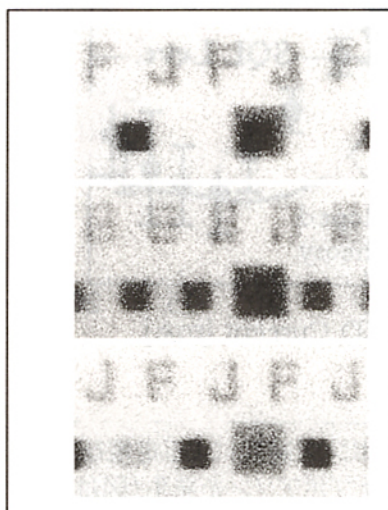


図中の写真は、原子集団を 20ms ほど自由落下させて撮影したもので、赤い部分ほど原子の密度が高く、青い部分の密度は低い。

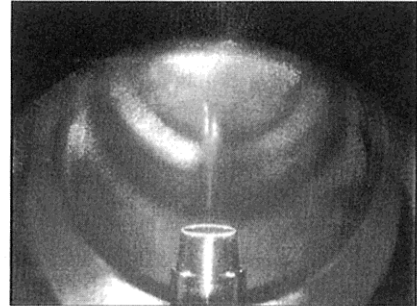
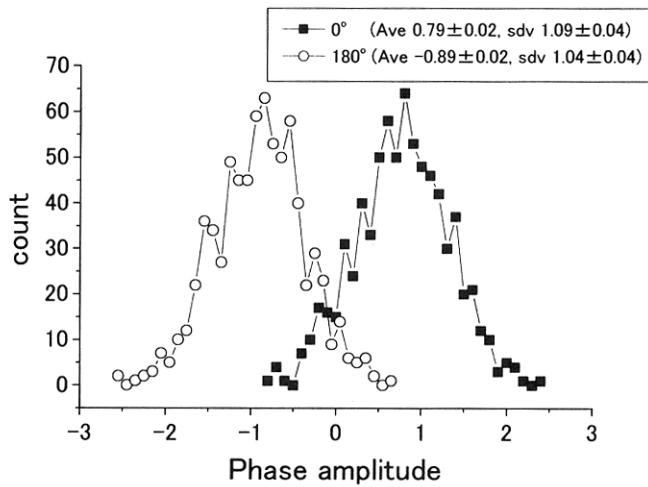
i) 操作 A。BEC 原子(図の楕円形)に左側から原子の共鳴周波数に対して 2GHz ほどの離調をとったレーザー光を照射する。この操作だけでは全ての原子が元の状態にとどまったままであることが分かる。

ii) 操作 B。BEC 原子の両側から周波数の異なるレーザー光を照射することでブラッグ散乱を起こし、一部の原子を別の運動量状態(光の持っている運動量の 2 倍の運動量  $2\hbar k$  を持つ状態)へ移す。ここでは、約 6.5%の原子が移動している。

iii) 操作 B に引き続いて操作 A を行ったとき。両者の単純な足しあわせ(重ね合わせ)にはならず、約 66%の原子が移動している。これは、操作 B により生み出された原子の運動量状態に対して A という操作を行うことで、その状態を占有する原子数が大きく増加したことを示す。すなわち原子波の振幅が光レーザーにより増幅された。

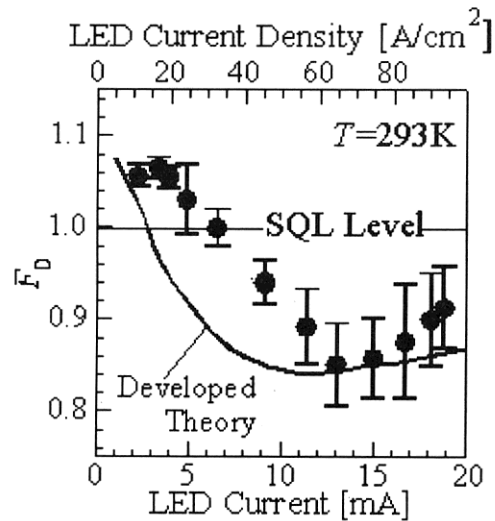
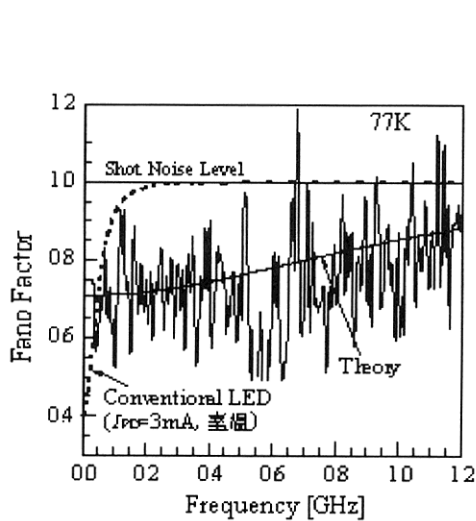


左図は、位相シフトが  $\pi$  になる電場をかけるか、かけないかによって F、J の文字の位置が入れ替わることを示している。右図は、シリコン表面に対する量子反射の原子速度依存性を示している。実線は理論値。



低温原子集団にレーザーを照射し、連続的に超高真空槽に原子を輸送する。3秒で $10^9$ 個の原子を貯めることが可能。

位相振幅の確率分布：信号光の平均光子数は1.0個で3000個のパルスのデータ。検出器の改良により、検出効率100%でも秘密鍵の誤り率が6.3%と理論的な限界に近い値が得られた。



高ドープ分離ヘテロ接合活性層を有するLEDを用いた微弱・広帯域サブポアソン光発生 (図はショット雑音を基準にした光強度雑音  
LED, ILED=138mA, IPD=39.8mA, 温度

バックワードポンプ過程による定電圧源駆動下でのサブポアソン光発生 (図はショット雑音を基準にした光強度雑音のLED電流依存性:低周波極限でLED出力光の雑音に換算した値, 室温)

#### 4. 主要論文リスト

- [1] A. Shimizu and T. Miyadera, Robustness of Wave Functions of Interacting Many Bosons in a Leaky Box, *Phys. Rev. Lett.* 85 (2000) 688–691.
- [2] A. Shimizu and H. Kato, Nonequilibrium Mesoscopic Conductors Driven by Reservoirs, *Low-Dimensional Systems* (ed. T. Brandes, Springer, 2000) pp.3–22.
- [3] M. Shigemori, A. Shimizu, T. Brandes and J. Inoue, Strong enhancement of superconducting correlation in a two-component fermion gas, *J. Phys. Soc. Jpn.* 68, 2194–2197 (1999)
- [4] T. Brandes, J. Inoue, and A. Shimizu, Oscillatory behavior of a superradiating system coupled to electron reservoirs, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 3952–3955.
- [5] Mach-Zehnder Bragg interferometer for a Bose-Einstein condensate; Y. Torii, Y. Suzuki, M. Kozuma, T. Sugiura, T. Kuga, E. W. Hagley, and L. Deng, *Phys. Rev. A*, 61(4), 041602–1–4 (2000).
- [6] Phase-coherent amplification of matter waves; M. Kozuma, Y. Suzuki, Y. Torii, T. Sugiura, T. Kuga, E. W. Hagley, and L. Deng, *Science*, 286, 2309–2312 (1999).
- [7] Novel optical trap of atoms with a doughnut beam; Takahiro Kuga, Yoshio Torii, Noritsugu Shiokawa, Takuya Hirano, Yukiko Shimizu, and Hiroyuki Sasada, *Phys. Rev. Lett.*, 78 (25), 4713–4716 (1997).
- [8] F. Shimizu, Specular reflection of very slow metastable neon atoms from a solid surface, *Phys. Rev. Lett.* vol 86(no 6) 987–990 (5 Feb. 2001)
- [9] F. Shimizu, S. Mitake and J. Fujita, Real time interferometric manipulation of a neutral atomic beam by electric field, *Can. J. Phys.* vol 78, 529–535 (2000).
- [10] J. Fujita, S. Mitake, and F. Shimizu, Interferometric modulation of an atomic beam by an electric field: a phase hologram for atoms, *Phys. Rev. Lett.* vol 84(#18) 4027–4030 (2000).
- [11] M. Kobayashi, Y. Kadoya, H. Yuji, R. Masuyama and M. Yamanishi: “Squeezing of photon-number fluctuations in the frequency range wider than 300MHz in light-emitting diodes at room temperature” *J. Opt. Soc. Am. B* Vol.17 No.7 pp.1257–1262 (2000).
- [12] M. Kobayashi, M. Yamanishi, H. Sumitomo and Y. Kadoya: Influence of backward-pump process on photon-number squeezing in a constant-current-driven heterojunction LED: Transition from thermionic emission to diffusion limits, *Phys. Rev. B*60, 16686–16700 (1999).
- [13] Y. Hokomoto, Y. Kadoya and M. Yamanishi: “THz electromagnetic wave radiation from coherent oscillation of exciton population in high-Q semiconductor microcavities” *Appl. Phys. Lett.* Vol.74, No.25 pp.3839–3841 (1999).
- [14] M. Kuwata-Gonokami, S. Inouye, H. Suzuura, M. Shirane, R. Shimano, T. Someya, and H. Sakaki, Parametric Scattering of Cavity Polaritons, *Phys. Rev. Lett.* 79, 1341 (1997)
- [15] T. Mukaiyama, K. Takeda, H. Miyazaki, Y. Jimba, and M. Kuwata-Gonokami, Tight Binding Photonic Molecule Modes of Resonant Bispheres, *Phys. Rev. Lett.*, 82, 4623 (1999)
- [16] T. Aoki, G. Mohs, M. Kuwata-Gonokami, and A. A. Yamaguchi, Influence of Exciton-Exciton Interaction on Quantum Beats, *Phys. Rev. Lett.*, 82, 3108–3111 (1999)
- [17] H. Saito and M. Ueda, Quantum-controlled few-photon state generated by squeezed atoms, *Phys. Rev. Lett.* vol. 79, pp. 3869–3872 (1997).
- [18] M. Ueda and A. J. Leggett, Macroscopic quantum tunneling of Bose-Einstein condensate with attractive interaction, *Phys. Rev. Lett.* vol. 80, pp. 1576–1579 (1998).
- [19] M. Ueda and A. J. Leggett, Ground-State Properties of a Rotating Bose-Einstein Condensate with Attractive Interaction, *Phys. Rev. Lett.* vol. 83, pp. 1489–1493 (1999).



5. 外部発表件数

論文 52 件

口頭発表

国内発表 99 件

国際会議発表 66 件

特許出願 3 件