

「量子効果等の物理現象」
平成7年度採択研究代表者

清水 明

(東京大学大学院総合文化研究科 助教授)

「量子場操作」

1. 研究実施の概要

我々は、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。例えば、電磁場と相互作用する微細構造中での物質励起が、複数の電子（または励起子や原子）にわたって量子コヒーレンスや相互作用が存在する状況を人工的に作り出して、その特性を調べ、そのような電子系と相互作用している電磁場の量子効果を調べようとしている。また、このような量子系を理論的に取り扱う手法を研究し、実験結果の解析と、新しい現象の理論的探索を行っている。

2. 研究実施内容

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。以下に、それぞれの項目の研究目標と現状を報告する。

A．量子場レーザー・原子波レーザー

原子を極限まで制御することにより、原子の量子性を追求することを目的とする。

現在までに、気体原子のボーズ・アインシュタイン凝縮を実現し、それを用いて、世界で初めて原子波マッハツェンダー干渉計による100%の原子波干渉を観測した。さらに原子波のコヒーレント増幅を行った。これは原子波レーザーの高出力化に向けての最初の一步と位置づけられる。また、原子ホログラフィー、原子干渉計、多原子相関の測定などを実現した。

原子レンズでは静電場で2次的に結像するレンズを開発した。また、リチウムトラップでは磁気光学トラップから磁気トラップに原子を移し、10秒以上の時定数で磁気トラップに原子を保持出来るようになった。原子ホログラフィーでは静電場による位相制御に関して色々の試みを行った。

また、理論的には、回転する引力相互作用をするボーズ凝縮体の基底状態の性

質を調べ、循環の量子化が部分的に破れていることを見出した。また、引力相互作用をするボース凝縮体は、変分法による従来の解析では、原子数がある臨界値を超えると全体が崩壊すると信じられていたが、今回、これを場の量子論の手法で再検討し、崩壊が密度の高いところで局所的にしか起こらないことを見出した。また、スピン自由度をもったボース凝縮体は、従来、平均場理論で調べられていたが、今回、その多体的な基底状態（ボソンがスピナー重項を作ること）とその磁気応答を明らかにした。さらに、トラップされたボース凝縮体により散乱されたレーザー光の光子統計を調べ、連続して散乱される光子が同じ方向に散乱される確率が増大することを見出した。

B．少数光子光非線形

光子数個で動作する極限的な光制御素子の原理を明らかにすることを目的とする。

現在までに、非常に高いQ値と小さなモード体積をあわせ持つ光閉じ込め系として誘電体微小球に着目し、球間の結合の特性を調べ、2球間の結合のパラメータを用いて1次元的配列球系の光の状態が予言できることを明らかにした。また、半導体励起子共鳴での光非線形性発現の微視的機構について、弱励起下に於ける非線形光学応答が弱く相互作用するボゾン描像によりよく説明されることを明らかにした。また、低温高密度下で生じる様々な電子正孔相のダイナミクスについて、光励起により低温高密度電子正孔状態を生成できることを確認した。

C．微細発光ダイオードにおける光子場制御

微細な発光ダイオードから極低電流～10nA、短時間域～100psec、光子数10個レベルで光子数の量子揺らぎが抑圧された光子束（サブポアソン光）を発生させることを目的とする。

サブ・ポアソン光発生の研究において重要な方向である雑音抑制の広帯域化を図る上では、活性層に分離閉じ込めヘテロ（SCH）構造を採用することが非常に有効であることを提案し、これまでに室温における帯域が300MHz以上になることを実証してきた。発光ダイオードの微細化において問題になるのは発光効率の低下である。この問題を回避する方法として活性層端をバリア層で覆うことができる選択的MBE成長法を採用し、成長等の条件出しを行ってきた。これまでに素子面積 $4.3\mu\text{m}^2$ の発光ダイオードにおいて発光効率1%弱を得た（測定温度35K）が、サブ・ポアソン光発生実験のためには効率の向上が必要となる。

また、量子暗号通信について、実用化に近づけるための新しい方式として、パルス光を用いた平衡型ホモダイン検出を用いる方式を提案し、実証実験を行うために必要な干渉計を組み、秘密鍵の配送を行った。パルス当たり数個の光子が含まれている信号パルスを1000パルス送ったとき、490個の秘密鍵を誤り率ゼロで生

成することができた。

D . 基礎理論の確立・新しい可能性の理論的検討

微細構造の物理現象の探索では、ミクロとマクロの区別があいまいな領域とか、ゆらぎの大きさが平均値よりも大きいような領域、平衡からはずれた領域を、並進対称性がない状況で分析する必要に迫られるので、この領域の基礎理論を確率する努力を行う。また、新しい可能性の理論的検討を行う。11年度は、ボーズ凝縮体の様々な量子状態の、環境に対する安定性を議論し、唯一の安定状態である、Coherent State of Interacting Bosons という特別な量子状態を見出した。また、微細構造の非平衡定常状態の新しい理論的枠組みを提案した。

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

A. Shimizu, "A Fundamental Limit of Measurement Imposed by the Elementary Interactions" Proc. 3rd Tohwa Univ. Int. Conf. Statistical Physics (Fukuoka, Japan, 1999) AIP, to be published.

A. Shimizu and H. Kato, "Nonequilibrium Mesoscopic Conductors Driven by Reservoirs" Interactions and Quantum Transport Properties of Lower Dimensional Systems (ed. T. Brandes, Springer, to be published)

J. Inoue, T. Brandes and A. Shimizu, "Renormalized Bosonic Interaction of Excitons" Phys. Rev. B61 (2000) 2863-2873.

清水 明・加藤 弘詔, 「開いたメソスコピック系の非平衡統計力学 --- 久保公式・ランダウアー公式が突き当たった問題点」 数理科学(2000)

M. Kozuma, Y. Suzuki, Y. Torii, T. Sugiura, T. Kuga, E. W. Hagley, and L. Deng "Phase-coherent amplification of matter waves" Science 286, 2309-2312 (1999).

Y. Torii, Y. Suzuki, M. Kozuma, T. Sugiura, T. Kuga, L. Deng and E. W. Hagley "Mach-Zehnder Bragg interferometer for a Bose-Einstein condensate" Phys. Rev. A61, 041602 (2000).

Y. P. Svirko, M. Shirane., H. Suzuura, M. Kuwata-Gonokami, "Four-Wave Mixing Theory at the Excitonic Resonance: Weakly Interacting Boson Model", J. Phys. Soc. Jpn. 68, 674-682 (1999)

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)

T. Mukaiyama, K. Takeda, H. Miyazaki, Y. Jimba, and M. Kuwata-Gonokami "Tight Binding Photonic Molecule Modes of Resonant Bispheres", Phys. Rev. Lett., 82, 4623-4626 (1999)

山西正道, 平野琢也, 角屋豊, "サブポアソン光 光子数揺らぎへの挑戦" 日本物理学会誌, 55巻3号180-188, 2000年.

鳥井寿夫, "ルビジウム原子気体のボース・アインシュタイン凝縮" 物性研究, 第72巻4号524-529, 1999年.

M. Kozuma, Y. Suzuki, Y. Torii, T. Sugiura, T. Kuga, E. W. Haglay, and L. Deng, "Phase-Coherent Amplification of Matter Waves" *Science* 286, 2309 (1999).

鳥井寿夫, "ルビジウム原子のボース・アインシュタイン凝縮発生のための実験手法" *レーザー研究*, 28巻3号147-153, 2000.

Y. Torii, Y. Suzuki, T. Sugiura, M. Kozuma, T. Kuga, L. Deng, and E. W. Haglay, "Mach-Zehnder Bragg interferometer for a Bose-Einstein Condensate" *Phys. Rev. A* 61, 041602(R), 2000.

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).

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* Vol.60 No.24, pp.16686-16700(1999).

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)

M. Ueda and K. Huang "Fate of a Bose-Einstein Condensate with Attractive Interaction" *Phys. Rev. A* vol.60, pp. 3317-3320 (1999).

H. Saito and M. Ueda "First- and second-order coherence of scattered laser light from a trapped Bose-Einstein Condensate" *Phys. Rev. A* vol.60, pp. 3990-3998 (1999).

M. Koashi and M. Ueda "Exact Eigenstates and Magnetic Response of Spin-1 and Spin-2 Bose-Einstein Condensates" *Phys. Rev. Lett.* vol.84, pp. 1066-1069 (2000).

T. Kishimoto, J. Fujita, S. Mitake, and F. Shimizu, "Gray-scale atom holography" *Jpn. J. Appl. Phys. (Part 2)* vol 38 (#6), L683-L686 (1999).

J. Fujita, S. Mitake, and F. Shimizu "Electric-field-modulated atomic beam holography" *Vac.Sci.Technol.*B17,2953(1999).

F. Shimizu, "Atom holography" *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, Eds. B. Bederson and H. Walther, vol 42, p73-93 (Academic Press, London 2000)

F. Shimizu, J. Fujita, S. Mitake, and T. Kishimoto, "Holography with Cold Atoms", *Laser Spectroscopy XIV International Conference*, Eds. R. Blatt, J. Eschner, D. Leibfried, and F. Schmidt-Kaler, p227-236, (World Scientific, Singapore,1999)

F. Shimizu, "Atom interferometry", *Quantum Coherence and Decoherence*, Eds. Y. A. Ono and K. Fujikawa, p109-114, (Elsevier, Amsterdam, 1999).