

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 1 月 24 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21244063

研究課題名（和文） 量子縮退原子を用いた原子干渉計による量子精密計測

研究課題名（英文） Quantum precision measurements using atom interferometers with quantum degenerated atoms

研究代表者

中川 賢一（NAKAGAWA KENICHI）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授

研究者番号：90217670

研究成果の概要（和文）：本研究は極低温量子縮退原子を用いた原子干渉計によって高精度な量子計測法を実現することを目標としたもので、以下の研究成果を挙げることができた。1) 全光学的手法を用いて高速に Rb 原子のボース凝縮(BEC)を生成する方法を開発した。2) 2 個の冷却 Rb 原子の間でリドベルグブロック効果を観測した。3) 位相変調された光定在波ポテンシャル中の冷却 Rb 原子において特異な量子輸送を見出した。4) レーザー冷却 Rb 原子を用いた原子干渉計による精密重力加速度計の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：We have developed various experimental methods using cold atoms towards the realization of the high precision quantum measurements based on using atom interferometers with quantum degenerated atoms, as follows. 1) We have developed a method for fast all-optical production of Rb BEC. 2) We observed a Rydberg blockade effect between two Rb atoms in a dipole trap. 3) We observed an enhanced momentum transport in cold Rb atoms using a phase modulated pulsed lattice potential. 4) We have developed a precision gravimeter using an atomic interferometer with laser cooled Rb atoms.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2010 年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2011 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
総計	23,100,000	6,930,000	30,030,000

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

キーワード：極低温原子、ボース・アインシュタイン凝縮、原子干渉計

1. 研究開始当初の背景

原子のレーザー冷却およびボースアインシュタイン凝縮(BEC)などの極低温原子の研究はその対象をボソンからフェルミオンへ、また原子から分子へと広げて近年目覚しく発展してきた。この極低温原子の研究は精密計測、量子情報処理、物性など幅広い分野へ

の応用が期待されている。

我々は⁸⁷Rb原子のBECを2001年に実現して以来、このBEC原子を用いたコヒーレント原子光学の研究を行ってきた。アトムチップと呼ばれる基板上の原子導波路を用いて原子を操作する方法を用いて高速・高効率なBEC原子の生成および集積化原子回路を

実現するための基盤技術を開発した。このアトムチップ上の BEC 原子を用いて長いコヒーレンス時間を実現する原子干渉計を実現し、BEC の精密計測への応用の可能性を示した。また光定在波パルスを用いて BEC 原子を選択的に一方向に加速する量子ラチェット効果を実現し、これが物質波の干渉効果によるものであることを明らかにした。一方、原子干渉計の精密計測への応用として、レーザー冷却 Rb 原子を用いた重力加速度計の開発を行い、重力加速度 g を約 10^{-6} の感度で測定できることを確認した。この検出感度は主に原子と重力との相互作用時間によって決まるため、地上では重力による自由落下時間約 1 秒で制限される。これに対して宇宙などの微小重力環境下で 1 秒以上の長い相互作用時間が得られる原子干渉計を用いて高い検出感度を実現しようという計画がヨーロッパを中心に進められている。これに対して我々はこのような微小重力下での実験が可能なアトムチップを用いた小型・可搬型の BEC 生成装置の実現に必要な要素技術の開発を行ってきた。

極冷却原子を用いた原子時計においては極めて高い周波数精度を実現するため原子間の相互作用の影響を回避するため、1 個の原子(イオン)を用いる、またはフェルミオン原子を用いる方法が用いられている。一方、原子干渉計においても原子間相互作用の影響を回避することができれば高感度かつ高精度な物理計測が可能となる。これに対して原子間の相互作用を積極的に用いて複数の原子間に量子力学的な絡み合い(エンタングル)状態を実現することにより、標準量子限界を超える高い検出感度が得られる原子干渉計が実現可能になると期待されている。

2. 研究の目的

本研究では極低温原子および BEC 原子を用いた原子干渉計によって極限的な量子計測を実現する方法を実現し、これを様々な物理量の精密計測に応用することを目指したものである。

当初の研究提案時においては以下の研究項目のもとで研究に取り組む事とした。

- ① 1 秒以上の長い相互作用時間(コヒーレンス時間)が得られる原子干渉計の実現
- ② 原子間相互作用の影響を回避(低減)する原子干渉計の実現
- ③ 非古典的な原子の量子状態(エンタングル)状態を用いた量子雑音限界を超える感度の実現
- ④ BEC 原子干渉計の精密計測への応用

これに対して本研究を実際に遂行するにあたって先行研究の進展を考慮して研究目標の見直しを行い、以下の研究項目に対して研究を行う事とした。

(1) 全光学的な手法による Rb 原子の BEC 生成法の開発

従来の大型の磁場トラップやアトムチップを用いたマイクロ磁場トラップによる BEC 生成法に対して、新たに光双極子トラップを用いたいわゆる全光学的な手法による BEC 生成法を開発を行うこととした。この方法は従来の大型の磁場トラップを用いた方法に比べて短時間で BEC 生成が可能となり、干渉計の検出感度向上に貢献する。また BEC 原子に対する光学的なアクセスが容易なため、鉛直方向にレーザー光を用いて BEC 原子を打ち上げて長い相互作用時間が得られる原子干渉計を実現する方法を開発ことも目標の一つとする。

(2) リドベルグブロッケードを用いた多数個の Rb 原子間の量子絡み合い状態の実現

原子干渉計において標準量子限界を超えて検出感度を向上するには複数の原子間に量子絡み合い状態を実現する必要がある。このためリドベルグ(Rydberg)状態の原子を用いてこれを実現する方法を開発することを目標とした。リドベルグ状態は主量子数が大きな原子の励起状態で、この状態の原子の間には非常に大きな双極子・双極子相互作用が働く。このためレーザーを用いて原子をこのリドベルグ状態に励起することにより複数の原子間に量子力学的な相関が生じ、量子絡み合い状態が実現可能となる。このため本研究では光双極子トラップ中のレーザー冷却 Rb 原子を用いてこのリドベルグ状態を用いた原子の量子絡み合い状態の実現を目指して研究を行うこととした。

(3) 周期的光定在波パルスによる極低温原子の回折を用いた物質波の多重干渉効果の研究

我々の先行研究において BEC 原子を周期的な光定在波パルスで回折する実験系を用いて量子キック回転子系の性質を調べる研究およびその様々な応用を行ってきた。これは物質波の多重干渉効果によるものであるが、これは本研究で目標とする長い相互作用時間が得られる原子干渉計にも応用することが可能である。このため本研究でも引き続き BEC 原子および冷却原子を用いてこの光定在波パルスによる物質波の回折の実験を行うこととした。

(4) レーザー冷却 Rb 原子を用いた原子干渉計による高精度重力加速度計の開発

原子干渉計を用いた精密計測として重力加速度計が一番有力な候補として挙げられ、現在多くのグループがこの精度向上および実用化を目指して研究を行っている。このため、本研究でもこの原子干渉計を用いた重力

加速度計の開発を行うこととした。また BEC 原子よりもレーザー冷却原子を用いた方が検出感度および精度の点で有利となるため、本研究ではレーザー冷却原子を用いることとした。既に我々の先行研究においてレーザー冷却 ^{87}Rb 原子のラマン遷移を用いた原子干渉計によって重力加速度 g を約 10^{-6} の精度で決定可能であることが確かめられている。このため本研究では同様の方法を用いてさらに相互作用時間を長くするための改良を加えて検出感度および精度を改善して重力加速度の決定精度を 10^{-8} まで向上することを目標に研究を行うこととした。

3. 研究の方法

先に挙げた4つの研究項目に対するそれぞれの研究方法を以下に示す。

(1) 全光学的手法による Rb 原子の BEC 生成法の開発

本方法ではレーザー冷却法によって $100\mu\text{K}$ 程度に予備冷却された ^{87}Rb 原子を光双極子トラップに移行し、このトラップ内で蒸発冷却を行って 100nK 程度まで温度を下げることで BEC を実現する。光双極子トラップは波長 1064 nm の高出力単一周波数発振ファイバーレーザーの光をビーム半径約 $40\mu\text{m}$ に集光し、さらにこれを角度約 35 度で2本交差した配置で用いている(図1)。レーザーパワー約 18W のとき、トラップの深さは約 2mK で、磁気光学トラップ(MOT)中の温度約 $100\mu\text{K}$ の Rb 原子を効率良く捕捉することができる。ダブル MOT 法および差動排気法を用いて光双極子トラップがある主真空チャンバー内の真空度を 10^{-10} トル以下に維持し、15秒以上のトラップ寿命を得ている。

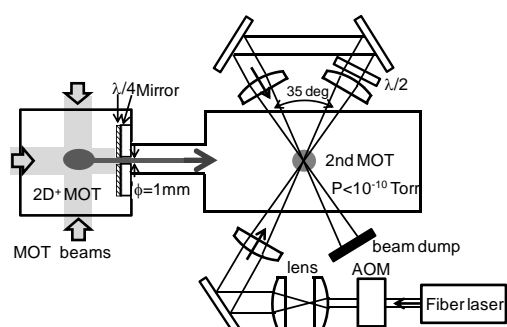


図1 全光学的 BEC 生成のための実験装置

(2) リドベルグブロックード効果を用いた Rb 原子間の量子絡み合い状態の実現

主量子数 n が大きなリドベルグ状態の原子は n の二乗に比例する大きな双極子モーメントを持つため、この励起原子間に大きな双極子・双極子相互作用が働く。この相互作用によるエネルギーシフトは数 μm の距離で数

10MHz 以上になる。このため共鳴するレーザー光によって1個の原子がリドベルグ状態に励起されると近傍の原子の励起準位がシフトしてレーザーの共鳴から外れて励起が抑制され、これはリドベルグブロックードと呼ばれる(図2)。本研究ではこのリドベルグブロックードを光双極子トラップ中の2個の Rb 原子を用いて行う(図3)。磁気光学トラップ(MOT)によって1個または2個のレーザー冷却 Rb 原子をトラップし、これを波長 1064nm のレーザー光をビーム半径 $4\mu\text{m}$ に集光して作られる微小光双極子トラップ(FORT)に移行する。この原子に波長 780nm と 480nm の二本のレーザー光を照射して二光子吸収遷移により主量子数 40 から 70 のリドベルグ状態に励起することにより、上記のリドベルグブロックードを実現する。

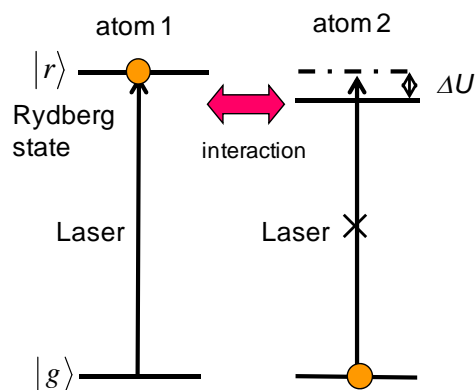


図2 2個の原子間のリドベルグブロックード

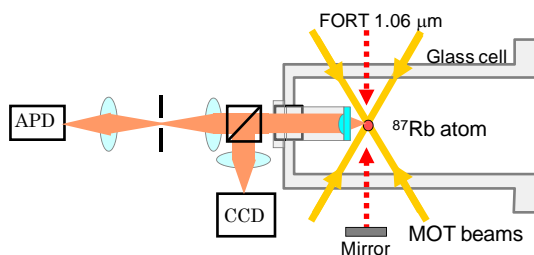


図3 リドベルグブロックードの実験装置

(3) 位相変調された光定在波パルスによる極低温原子の回折実験

磁気光学トラップ(MOT)および偏光勾配冷却によって約 $20\mu\text{K}$ に冷却された Rb 原子に対向する2本のレーザー光を一定の間隔で短いパルスとして照射して原子を回折させる。このときパルス間の時間間隔を二光子の反跳周波数の逆数に等しい、いわゆる Talbot 時間に一致させると回折された物質波の位相が強め合って原子が加速される量子共鳴が現れる。これに対して今回の研究では対向する2本のレーザー光の相対位相をパルス

毎に変調して量子共鳴効果の変化を観測することとした(図4)。このためワンチップマイクロコントローラーを用いた高速位相変調器を新たに開発した。これによって約 $16\mu\text{s}$ 毎に定在波の位相を任意に高精度に制御することが可能になる。定在波パルスで回折された原子の速度分布は CCD カメラによる原子雲の吸収像より求め、これより原子の運動エネルギーが求められる。

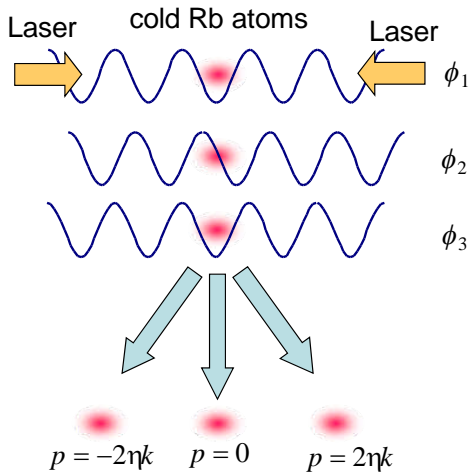


図4 位相変調された光定在波パルスによる原子回折

(4) 原子干渉計を用いた高精度重力加速度計の開発

先行研究において開発したレーザー冷却 ^{87}Rb 原子の原子干渉計を用いた重力加速度計を基に感度および精度向上を目指して改良した新しい原子干渉計の開発を行った。残留磁場による影響を低減するため、真空チャンバーの材料として従来のステンレスから非磁性のチタン合金を用いた。このチタン合金はステンレスに比べて脱ガスが小さいため、 10^{-9} Torr 以下の超高真空を得るにも都合がよい。図5に真空チャンバーの概要を示す。この真空チャンバーの外側にパーマロイ材を用いた二層の磁気シールドを配置して地磁気等の外部からの磁場の影響を十分低減するようにした。先の先行研究において問題になった床からの振動雑音の影響を低減するため、低周波域の防振性能が高い防振台を用いてラマン遷移のためのレーザー光の折り返しの鏡の防振を行うこととした。

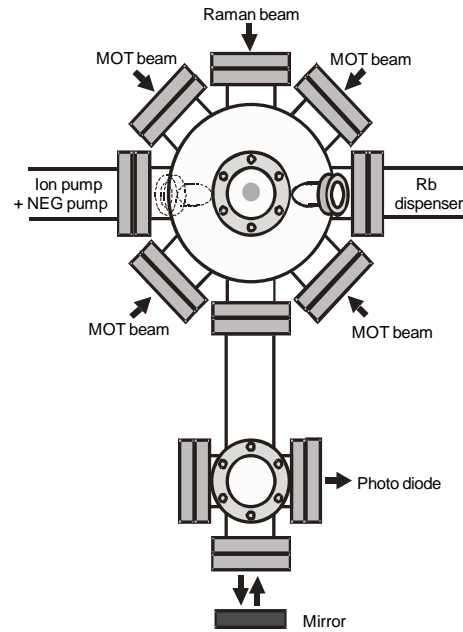


図5 原子干渉計を用いた重力加速度計の真空チャンバー

4. 研究成果

先に挙げた4つの項目に対して今回得られた研究成果を以下にそれぞれ示す。

(1) 全光学的手法による Rb 原子の BEC 生成法の開発

先の図1で示した装置を用いて光双極子トラップを用いた全光学的手法による Rb 原子の BEC 生成法の開発を行った。波長 $1\mu\text{m}$ の高出力ファイバーレーザーを半径約 $40\mu\text{m}$ に集光し、さらにこれを折り返して角度 35 度で交差させるクロスビームトラップを用いた(図6)。

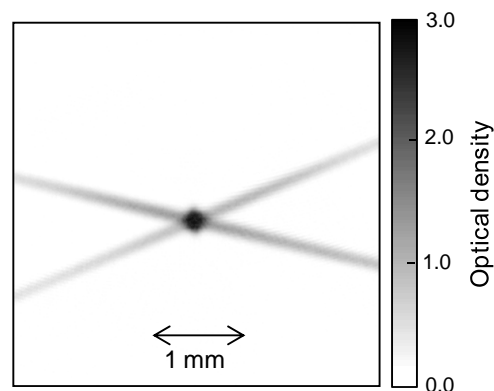


図6 クロスビーム光双極子トラップにトラップされた冷却 Rb 原子の吸収像

この光双極子トラップに高い効率で磁気光学トラップ中の冷却原子を移行するため、冷却レーザーの離調の最適化を行うことにより 6×10^5 個の冷却 Rb 原子をクロスビームトラップにローディングすることができた。次に光双極子トラップ中の原子の蒸発冷却においてもポテンシャルの減衰曲線を最適化することにより約 3 秒の蒸発冷却によってボース凝縮体(BEC)を生成することに成功した。相転移温度は約 100nK で、それ以下の温度において約 7000 個の純粋な BEC 原子が得られた(図 7)。今後さらに最適化を行うことにより BEC 原子数を $2 \sim 3 \times 10^4$ 程度に増やすことが可能である。このため今後この方法を用いた BEC 干渉計の実現を目指してさらに研究を進めていく予定である。

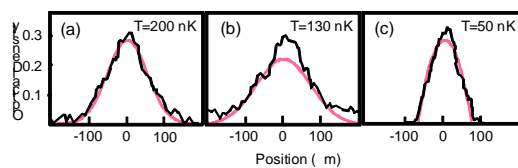


図 7 相転移近傍での原子雲の速度分布。(a) サーマル原子、(b) サーマル原子+BEC、(c) BEC。

(2) 光双極子トラップ中の 2 個の原子間のリドベルグブロックードの実現

複数の原子間に量子相関を実現するため、2 個の原子を用いてリドベルグブロックード効果の検証を行う実験を行った。

先の図 3 に示した実験装置を用いて磁気光学トラップに冷却 Rb 原子を 1 個または 2 個捕捉し、次にこれを微小光双極子トラップに移行して波長 780nm および 480nm のレーザー光による二光子吸収遷移によって主量子数 n が大きなリドベルグ状態に励起する実験を行った。最初に単一 Rb 原子を $n=43$ のリドベルグ状態に励起して明確なラビ振動を観測することができた。これに対して原子数を 2 個にし、さらに $n=75$ の励起状態に励起すると、2 個同時に励起される確率が下がり、ブロックード効果を観測することに成功した(図 8)。このため今後はこのリドベルグブロックード効果を用いて 2 個およびそれ以上の複数の原子の間に量子相関を実現する実験を進めていく予定である。

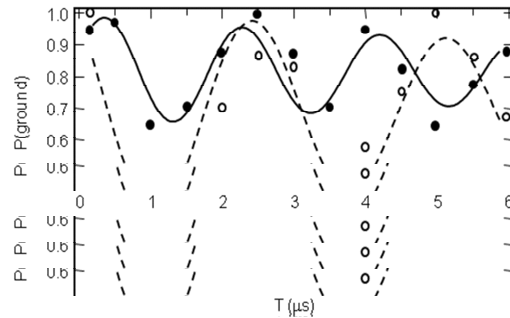


図 8 2 個の Rb 原子のリドベルグブロックード効果の観測

(3) 位相変調された光定在波パルスによる極低温原子の回折実験

極低温 Rb 原子の物質波を位相変調された光定在波パルスで回折する際に各パルスの定在波の位相を周期的に $0, \pi/2, 0, -\pi/2, 0, \dots$ と変調することによりパルスごとに共鳴的にエネルギーが増加する量子共鳴効果があるような変化するかを実験で検証を行った。その結果、変調が無い場合とは異なるパルス周期において量子共鳴によるエネルギー増加が見出され、これは理論的な計算によっても再現された(図 9)。

今回観測された新しい量子共鳴効果は今後さらに研究を進めることにより多重干渉効果を用いた原子干渉計の実現にも結びつくものと期待される。

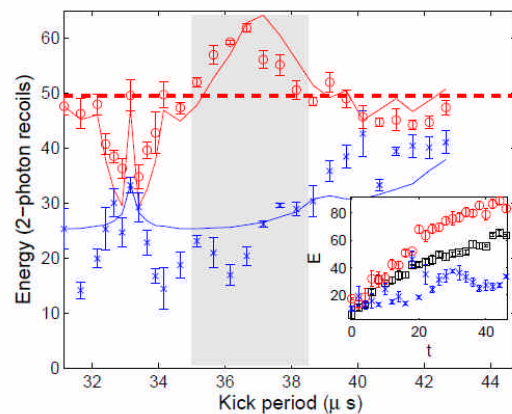


図 9 光定在波パルスによる物質波の回折。変調あり(赤)、変調無し(青)の場合の原子の運動エネルギー。

4) 原子干渉計を用いた高精度重力加速度計の開発

今回開発した原子干渉計のための非磁性のチタン合金製の真空チェンバーおよび磁気シールドの評価を行った。磁気プローブでチェンバー内部の残留磁場を測定したとこ

ろ 10mG 以下であることが確認され、目標とする重力加速度の測定精度を得るには十分小さい値であると考えられる。

また振動雑音の影響を低減するため超低周波用防振台(Minus K Technology 社)を導入して、この防振特性の評価を行い、干渉計の測定周波数帯域である数 Hz から 10Hz において振動雑音が低減していることが確認された。またさらにアクティブ防振装置を開発し、防振台の共振ピーク付近の振動雑音ピークをさらに低減することができた。

今回の研究においてはチタン合金製真空チャンバーの開発に時間がかかり、新しい装置を用いた原子干渉計の基本動作の確認には至らなかった。今後さらに研究を進めて改良された新しい原子干渉計の検出感度および精度向上を実験的に検証する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

(1) Sanjay Kumar, Shuuichi Hirai, Yuuki Suzuki, Masahide Kachi, Mark Sadgrove, and Ken'ichi Nakagawa, Simple and Fast Production of Bose-Einstein Condensate in a 1 μm Cross-beam Dipole Trap, *J. Phys. Soc. Jpn.* 81, 084004 (2012). (査読有)

DOI: 10.1143/JPSJ.81.084004

(2) Mark Sadgrove, Sandro Wimberger, and Ken'ichi Nakagawa, Phase-selected momentum transport in ultra-cold atoms, *Eur. Phys. J. D* 66, 155 (2012). (査読有)

DOI:10.1140/epjd/e2012-20578-6

(3) 中川賢一, "レーザー励起リドベルグ原子を用いた量子もつれ状態の生成とその量子情報への応用", *レーザー研究*, 39, 904 (2011). (査読有)

(4) Mark Sadgrove and Ken'ichi Nakagawa, Fast externally triggered phase controller for an optical lattice, *Rev. Sci. Instrum.* 82, 113104 (2011). (査読有)

DOI:10.1063/1.3655447

(5) Zhanchun Zuo, Ken'ichi Nakagawa, Multi-particle entanglement in a one-dimensional optical lattice using Rydberg atom, *Phys. Rev. A* 82, 062328 (2010). (査読有)

DOI:10.1103/PhysRevA.82.062328

(6) Zhanchun Zuo, Miho Fukusen, Yoshihito Tamaki, Tomoki Watanabe, Yusuke Nakagawa and Ken'ichi Nakagawa, Single atom Rydberg excitation in a small dipole trap, *Optics Express* 17, 22898-22905 (2009). (査読有)

DOI:10.1364/OE.17.022898

(7) Mark Sadgrove, Sanjay Kumar, and Ken'ichi Nakagawa, Noise induced resonance for atoms in a periodic potential,

Phys. Rev. Lett. 103, 010403 (2009). (査読有)

DOI:10.1103/PhysRevLett.103.010403

(8) Mark Sadgrove, Sanjay Kumar, and Ken'ichi Nakagawa, Signal analysis with atom optics, *Phys. Rev. A* 79, 053618 (2009). (査読有)

DOI:10.1103/PhysRevA.79.053618

[学会発表] (計 7 件)

(1) Sanjay Kumar, Mark Sadgrove, Yuuki Suzuki, and Ken'ichi Nakagawa, All-Optical Realization of a Bose-Einstein Condensation in a 1 μm Dipole trap, 日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月

(2) Sanjay Kumar, Mark Sadgrove, and Ken'ichi Nakagawa, Large Area Interferometry for Gravimetry, 日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月

(3) Mark Sadgrove, Sandro Wimberger, and Ken'ichi Nakagawa, 位相変調された定在波ポテンシャル中原子の古典エネルギー限界超越、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月

(4) Zhanchun Zuo, Saisuke Okuyama, and Ken'ichi Nakagawa, Distribution of interacting atoms in a one-dimensional lattice, 日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学、2011 年 9 月

(5) S. Kunar, M. Sadgrove, K. Nakagawa, Study of cold atoms in optical lattice at quantum resonance with decoherence, 日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月

(6) M. Sadgrove, K. Nakagawa, Towards the observation of amphibious eigenstates with cold atoms, 日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月

(7) 平井秀一、牟田真弓、中川賢一、全光学的手法による BEC 生成に向けた低速原子源開発、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学、2010 年 9 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 賢一 (NAKAGAWA KENICHI)

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授

研究者番号：90217670

(2) 研究分担者

岸本哲夫 (KISHIMOTO TETSUO)

電気通信大学・先端領域教育研究センター・特任准教授

研究者番号：70420239