

高橋 義朗

京都大学大学院理学研究科・教授

超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発

§1. 研究実施体制

(1)「京大」グループ

- ① 研究代表者: 高橋 義朗 (京都大学理学研究科、教授)
- ② 研究項目
 - ・光格子中量子気体の超高分解能レーザー分光
 - ・Yb 原子の量子気体顕微鏡の開発
 - ・冷却原子のスピンスクイジング技術の開発

(2)「NICT」グループ

- ① 主たる共同研究者: 井戸 哲也 (独立行政法人情報通信研究機構経営企画部企画戦略室、プランニングマネージャー)
- ② 研究項目
 - ・光格子時計を周波数基準とした Ca⁺単一イオン時計の周波数測定の実験
 - ・液体窒素温度環境中のストロンチウム原子による光格子時計の開発

(3)「航空電子」グループ

- ① 主たる共同研究者: 江藤 和幸 (日本航空電子工業株式会社商品開発センター、UV 技術シニアエキスパート)
- ② 研究項目
 - ・超狭線幅光源の実現を目指した低損失誘電体多層膜鏡の開発

(4)「NTT」グループ

- ① 主たる共同研究者: 山下 眞 (日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所量子光物性研究部、主任研究員)

②研究項目

- 超狭線幅光源を用いた光格子中冷却原子の量子状態制御に関する新たな理論の構築
- 光格子量子コンピュータ実現に向けた冷却原子の多量子ビット状態(クラスター状態)の生成方法ならびにその量子操作方法の提案
- 光格子時計の超高精度化に向けた冷却原子のスピンスクイジング制御を利用した新たな測定方法の提案

§2. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(3-1)に対応する)

京大グループ

まず、NICTグループと協力して数100Hz程度の線幅を得ることに成功した光源を用いて高分解能レーザー分光実験を行い、強相関量子多体系の典型的な量子相である、モット絶縁体状態について、格子中の原子数が異なるサイトを分離して観測・制御する手法の開発に成功した(図1)。特に、サイト数ごとに、コヒーレントラビ振動を誘起することに成功し、そのラビ振動

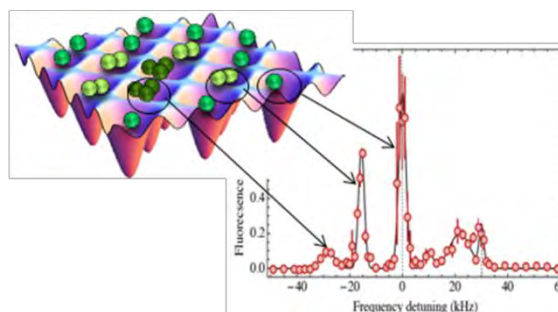


図1 モット絶縁体の超高分解能レーザー分光

数がいわゆるボソン誘導効果により、多重占有の場合には増大することを観測した。また、これを、超流動-モット絶縁体転移の精密測定に応用展開し、特に、NTTグループと協力して、コヒーレントな超流動成分に起因するブロードなスペクトル構造と、非超流動成分に起因する鋭いスペクトル線構造の和として、実験結果を非常によく再現することを突き止めた(投稿準備中)。

さらに、この手法をもとに見出していたボース同位体の基底状態と準安定状態の原子間相互作用の変化のメカニズムについて、異方性原子間相互作用に基づくフェッシュバハ共鳴であることを突き止め論文としてまとめた。また、フェルミ原子のフェッシュバハ共鳴も新たに発見した。

また、光格子時計の改良として取組んでいるスピンスクイジング技術の開発において、磁気光学トラップ中の冷却原子スピンの集団に対して量子非破壊測定を行い、その測定結果を原子スピン集団に高速フィードバック制御することにより、量子測定に伴う波束の収縮のランダムさを低減する技術を世界で初めて開発した(KU-1)(図2)。また、より長いコヒーレンス時間と高いスクイジングレベルが得る

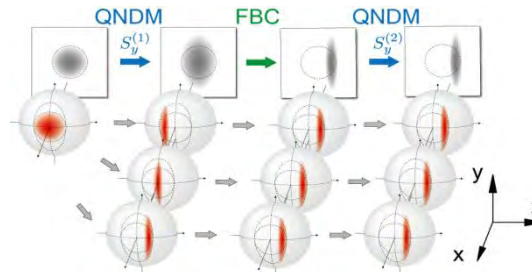


図2 原子スピンの量子フィードバック制御

ための光トラップのための真空装置を完成し、大きな光学密度と1秒以上の長い寿命をもった超低温原子スピン集団を生成することに成功し、ファラデー回転を観測することに成功した。さらに、YbLi原子混合系の研究についても、アンダーソン局在やアンダーソン直交定理などの問題に取り組むべく、混合系を光格子に導入し、Yb原子多重物質波干渉とそのLi原子導入による影響の観測、および高分解能レーザー分光に成功した。また、これまでになかった高いスピン対称性をもった強相関量子多体系として、SU(6)モット状態を実現した研究成果をまとめて論文として発表した(KU-2)。

これら以外にも、Yb原子の高空間分解能イメージングの開発、3次元光格子中での8秒という長寿命を持つ分子の生成(KU-3)、準安定状態原子の衝突安定性の精密測定(KU-4)、p-波光フェッシュバハ共鳴法の開発(KU-5)などの成果を得ることができた。Lieb格子についてもほぼ構築すること

に成功した。

NICT グループ

a) 光格子時計を周波数基準とした Ca⁺単一イオン時計の周波数測定の実験

従来の光周波数標準の研究開発はもっぱらその周波数精度や安定度を改善する方向に進んできたが、近年光格子時計を含む複数の光時計がCs原子泉時計より高い性能が得られるようになり、そろそろ光周波数標準を利用して実際に光周波数の測定を行うフェーズになりつつある。NICTには精度 5×10^{-16} のSr光格子時計の他に単一カルシウムイオン時計が精度 2×10^{-15} であり、今回我々はこの2つの時計の間の周波数比を $f(\text{Ca}^+) / f(\text{Sr}) = 0.957\ 631\ 202\ 358\ 049\ 9$ と 2×10^{-15} の精度で決定し、また周波数比の時間的なふらつき(安定度)も測定した^{論文番号}。ここでは従来のマイクロ波基準に頼ることなく、周波数比を決定しており、周波数比(Ca⁺遷移周波数)/(Sr遷移周波数)はSrの光学遷移を周波数基準とした測定そのものである。またここで得られた周波数比とNICTを含む世界5機関で測定されているSr光格子時計の絶対周波数の重み付き平均値との積によって得られるCa⁺遷移周波数は、現行のCs基準を基準として直接測定したCa⁺の絶対周波数と良い一致を示し、今回利用した全光学的手法による周波数比の測定が問題無く機能していることが確認された。また、昨年度測定したSr光格子時計の絶対周波数、今年度測定したCa⁺単一イオン時計の絶対周波数、そして周波数比測定の論文は2012年9月に開催された国際度量衡委員会(BIPM)の時間周波数諮問委員会(CCTF)に報告され、両遷移の現在のBIPMの推奨周波数においては我々の測定値が寄与して決定されている。また今後CCTFはCs基準ベースの絶対周波数のみならず、異なる光学域にある時計遷移間の周波数比についても報告を求めることになり、今回の我々の周波数比測定はそのさきがけとなっている。

b) 液体窒素温度環境中のストロンチウム原子による光格子時計の開発

現在Sr光格子時計の精度向上を妨げているのは黒体輻射による周波数シフトである。これを抑制するために、液体窒素温度程度の低温環境に光格子を設定する新しい真空チャンバーを設計した。Sr光格子時計では衝突シフトが僅かながらあり、これが18桁の精度を目指す上で問題になることが最近分かってきている。従って、今回設計した方式では低温環境でありながら光共振器で強度増強して強度を稼いで大きいトラップ体積を確保して信号強度を下げずに密度のみを小さくする設計としている。

航空電子グループ

超狭線幅光源の実現を目指した低損失誘電体多層膜鏡の開発

これまでに行った成膜プロセスの改善により、光格子時計の波長である698nmにおいて反射率を99.9974%(フィネス 120,800)から99.99941%(フィネス 532,000)に向上することができた。また、波長1064nmでは反射率99.99975%(フィネス 1,257,000)が得られている。

このプロセス改善により、SiO₂ 薄膜(低屈折率層)や Ta₂O₅ 薄膜(高屈折率層)が物理的・化学的にどのような状態からどのような状態に変化したか知るために各種分析を行った。

まず SiO_2 膜の場合、成膜直後の膜中には過酸化ラジカル ($\equiv\text{Si}\cdot\text{O}\cdot\text{O}\cdot$) とよばれる常磁性の欠陥が $6 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 存在しているが、 E' ($\equiv\text{Si}\cdot$) や NBOHC ($\equiv\text{Si}\cdot\text{O}\cdot$) は検出感度以下であった。また ODC ($\equiv\text{Si}\cdot\cdot\cdot\text{Si}\equiv$) とよばれる酸素欠陥が存在し、さらに O_2 が溶存していることも確認できた。この状態の SiO_2 膜を後処理すると、 O_2 濃度が低下するとともに過酸化ラジカルおよび ODC の濃度が低下することがわかった。条件を最適化することで電子スピン共鳴や光ルミネッセンスの計測感度以下 (今回の条件では電子スピン共鳴の場合、過酸化ラジカルの計測下限は $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$) に低下させることができた。さらに三員環の密度も $2/3$ に低減していることがわかった。これはスパッタ法で作製した場合、デポ粒子のもつ運動エネルギーのために比較的小さな網目構造が多く存在していたのが、より大きな網目構造を持つようになり、バルクの構造に近づけることができたことを示している。

一方 Ta_2O_5 の場合、ラマン分析では膜中の O_2 を検出できなかった。我々は成膜プロセス中に酸素ガス (O_2) を供給しているが、 Ta_2O_5 の場合十分に膜中に酸素分子が取り込まれていないのではないかと考えられる。そのため、化学量論値を得ることができず酸素欠陥が存在し、これが吸収の原因になっているのではないかと推測した。そこで、原子状の酸素であれば膜中に取り込まれ、欠陥密度を低減できるのではないかと考え、既存のイオンガンを用いて原子状酸素を発生させるための治具を作製した。本来イオンガンは、プラズマチャンバーの開口部に電極が設けられており、その電極に電圧を加えることでプラズマ中のイオンを引き出し加速するような構造になっている。今回、プラズマ中の荷電粒子をチャンバー内に閉じ込め、中性の酸素原子がチャンバーから漏れ出てくるような構造とした。本格的な成膜実験は来年度行う予定である。

NTTグループ

NTTグループでは京大グループによる三次元光格子に閉じ込められた ^{174}Yb 原子気体を用いた超高分解能分光実験を対象とした理論研究を行った。有限温度のグッツヴィラー近似法とグリーン関数を応用したスペクトル計算法に基づいて実験結果を詳細に調べたところ、これまで解析が難しかった超流動-モット絶縁体転移近傍での分光スペクトルが、コヒーレンスのある超流動成分と格子点上に局在したモット絶縁体成分とで構成される二相モデルで定量的に説明できることを見出した。現在、微視的なモデルに基づいた理論からこの結果の裏付けを行っており、今後も京大グループと協力して、超高分解能分光による三次元ボース・ハバードモデルの有限温度での相図の探索を目指す。

また一方で、光格子中の多成分冷却原子気体に関する理論解析も進展した。自己エネルギー汎関数法や変分モンテカルロ法などの平均場近似を超えた理論解析を適用することで、三成分フェルミ原子系での斥力相互作用で生じる新奇なカラー超流動相 (NTT-2) や、スピナー-1 ボース原子系での量子揺らぎが顕著なスピン・ネマティック相 (NTT-1) の特性を明らかにした。これらの理論結果は将来実験的に検証されるものと期待できる。

これらに加えて、量子計算や量子操作に関する基礎理論の研究として、一般的な格子形状に基づくトポロジカル表面モードがエラーやロスに対してどのような耐性を示すかを解明し (NTT-3)、さら

に、コヒーレント光を用いた量子ビット制御において原理的な限界が存在することを解明する (NTT-5) などの成果が得られた。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

[KU-1] R. Inoue, S. Tanaka, R. Namiki, T. Sagawa, and Y. Takahashi, “Unconditional quantum-noise suppression via measurement-based quantum feedback”, *Phys. Rev. Lett.* (accepted)

原子スピンの集団に対して、量子非破壊測定を行い、かつその測定結果を原子スピン集団に高速フィードバック制御することにより、量子測定に伴う波束の収縮のランダムさを低減する技術を世界で初めて開発した。

[KU-2] R. Yamazaki, S. Taie, S. Sugawa, K. Enomoto, and Y. Takahashi, Observation of a p-wave optical Feshbach resonance, *Phys. Rev. A*, Vol.87, Issue. 1, pp. 010704-1(R)- 010704-5, 2013 (DOI:10.1103/PhysRevA.87.010704)

[KU-3] Shinya Kato, Rekishu Yamazaki, Kosuke Shibata, Ryuta Yamamoto, Hirotaka Yamada, and Yoshiro Takahashi, Observation of long-lived van der Waals molecules in an optical lattice, *Phys. Rev. A*, Vol.86, Issue 4, pp.043411-1-5, 2012 (DOI:10.1103/PhysRevA.86.043411)

[KU-4] Satoshi Uetake, Ryo Murakami, John M. Doyle, and Yoshiro Takahashi, Spin-dependent collision of ultracold metastable atoms, *Phys. Rev. A*, Vol.86, Issue 3, pp.032712-1-5, 2012 (DOI:10.1103/PhysRevA.86.032712)

[KU-5] Shintaro Taie, Rekishu Yamazaki, Seiji Sugawa & Yoshiro Takahashi, An SU(6) Mott insulator of an atomic Fermi gas realized by large-spin Pomeranchuk cooling, *Nature Physics*, Vol.8, pp.825-830, 2012 (DOI:10.1038/nphys2430)

[NICT-1] Kensuke Matsubara, Hidekazu Hachisu, Ying Li, Shigeo Nagano, Clayton Locke, Asahiko Nogami, Masatoshi Kajita, Kazuhiro Hayasaka, Tetsuya Ido and Mizuhiko Hosokawa, “Direct comparison of a Ca⁺ single-ion clock against a Sr lattice clock to verify the absolute frequency measurement”, *Optics Express*, vol. 20, No. 20, pp 22034-22041, 2012 (DOI:10.1364/OE. 20. 022034)

[NTT-1] Yuta Toga, Hiroki Tsuchiura, Makoto Yamahsita, Kensuke Inaba, and

Hisatoshi Yokoyama, “Mott Transition and Spin Structures of Spin-1 Bosons in Two-Dimensional Optical Lattice at Unit Filling”, *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 81, pp.063001-1-4, 2012 (DOI: 10.1143/JPSJ.81.063001)

[NTT-2] Kensuke Inaba and Sei-ichiro Suga, “Superfluid state of repulsively interacting three-component fermionic atoms in optical lattices”, *Physical Review Letters*, vol. 108, pp. 255301-1-5, 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.255301)

[NTT-3] Keisuke Fujii and Yuuki Tokunaga, “Error and loss tolerances of surface codes with general lattice structures”, *Physical Review A*, vol. 86, pp. 020303(R)-1-5, 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevA.86.020303)

[NTT-4] Sei-ichiro Suga and Kensuke Inaba, “Perturbative approach to three-component fermionic atoms in optical lattices”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 391, 012166-1-4, 2012 (DOI: 10.1088/1742-6596/391/1/012166)

[NTT-5] Kazuhiro Igeta, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, “Fundamental limit to qubit control with coherent field”, *Physical Review A*, vol. 87, pp. 022321-1-8, 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevA.87.022321)