

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

- ・Yb 原子励起用高安定光源の開発
- ・高安定磁場勾配・光格子一体型装置の開発
- ・光格子中冷却原子のスピンスクイジング技術の開発
- ・YbLi 極性分子に向けたレーザー冷却

### (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、主任研究員)

② 研究項目

- ・Sr 光格子時計の開発
- ・30cm 長光共振器の開発
- ・光共振器におけるアクティブ光学除振方式による除振法の研究

### (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 (NTT 物性科学基礎研究所、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

(文中の引用番号等は(3-1)に対応する)

### 京大グループ

まず、光格子点の個別量子操作・検出技術の開発において、今年度においては、薄型ガラスセル中に2次元のボース凝縮体を生成し、光格子を導入し、2次元系での超流動・モット絶縁体転移的な振舞いを観測した。また、安定に大きな磁場勾配を印加可能なコイルも設置し<sup>(KU-2)</sup>、高い集光効率の対物レンズも配置して、吸収画像を得ており、今後、光格子点の個別量子操作・検出の準備が完成した。また、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った結果、超流動—モット絶縁体転移に関する重要な知見を与えることを、NTTグループと共同で見出した。さらに、従来のフェシュバハ共鳴とは異なるメカニズムによる原子間相互作用操作法を見出した。

また、光格子時計の改良として取り組んでいるスピンスクイジング技術の開発において、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ための光トラップのための真空装置の新たな立ち上げをほぼ終了した。さらに、YbLi原子混合系の研究についても、同時縮退の成功を報告したが<sup>(KU-6)</sup>、アンダーソン局在などの問題に取り組むべく、光格子系の光学系を新たに構築することにほぼ成功した。また、これまででない強相関量子多体系として、ボース・フェルミ混合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<sup>(KU-5)</sup>。

これら以外にも、光格子中でのサブラディエント状態分子の生成<sup>(KU-1)</sup>、異核光会合分光<sup>(KU-3)</sup>、最も存在比の小さい同位体のボース凝縮体生成<sup>(KU-4)</sup>などの成果を得ることができた。

### NICTグループ

まず、Sr光格子時計の開発については、前年度、原子時計動作を確認したが、今年度、NICTにて運用しているCa+単一イオン型光格子時計との安定度比較によって16乗台の安定度を持つことを確認した。また、東大本郷キャンパスにある香取教授のグループの光格子時計とオール光リンクを確立し<sup>(NICT-2)</sup>、NICTの光格子時計の信号光を周波数コムでコヒーレントに通信帯波長に変換・伝送し、周波数比較を行った。結果両拠点の標高差65mに起因する一般相対論的周波数シフトを確認、それを校正した結果両者の時計が物理的に離れた拠点に所在する時計として初めて16乗台で一致することを確認した<sup>(NICT-1)</sup>。また、異波長のより安定度の高いクロックレーザーに光周波数コムで位相リンクしてクロックレーザーの安定度を改善し、それによって光原子時計を動作させて効率的に系統誤差の評価を行い、最終的に光格子時計の生成する光の絶対周波数を計測した<sup>(NICT-3)</sup>。

また、前年度原理検証に成功した「アクティブ光学除振方式」について、除振に関して特に配慮されていない汎用10cm長円筒型共振器においてこの除振方式を適用し、その除振効果を定量的に評価した。結果、振動のため特殊形状の共振器でしかこれまで到達出来なかった熱雑音限界に汎用形状の共振器で到達した。さらに、30cm長光共振器の開発についても進展があった。現在、狭線幅光源の線幅は周波数安定化をする際の参照光共振器の安定度によって決まり、光

共振器の安定度は誘電体多層膜鏡の熱雑音で制限されている。これを克服するため、共振器長を大きく取って、熱雑音の全体の共振器長への影響を相対的に小さくするのを目指し、共振器長を従来の 10cm から 30cm へ大きく取ったものを製作した。共振器用の誘電体多層膜鏡については 20ppm 以下の低損失が要求され、同一チーム内の航空電子グループにて成膜し、また筐体の零膨張ガラス材については国内ガラスメーカーより調達することが出来た。

### 航空電子グループ

昨年度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 99.999% (フィネス 314,000) から 99.99941% (フィネス 532,000) に向上することができた。今年度は、この条件で NICT 向けの多層膜ミラーを作製した。このミラーのフィネスをリングダウン法で 144 回測定した結果を図1に示す。また、107 番目のデータについて、光子寿命の測定結果を図中に挿入した。この時の光子寿命は 53.1  $\mu$  sec、フィネス 501,000 反射率 99.99937% であった。さらに、このミラーを NICT より供給された長さ 30cm のスペーサにオプティカルコンタクトにより接合し、キャビティを完成させ NICT に提供した。また今年度は、さらに反射率を向上させるために改善したプロセスで作製した SiO<sub>2</sub> 膜の電子スピン共鳴 (ESR) 分析を行い、新プロセスでは過酸化ラジカルのシグナルは検出されず、検出下限 ( $1 \times 10^{17}$ ) 以下に低減できていることがわかった。来年度も引き続き膜の分析を行いつつ、698nm における反射率の向上を目指して成膜プロセスの改善を図っていく。

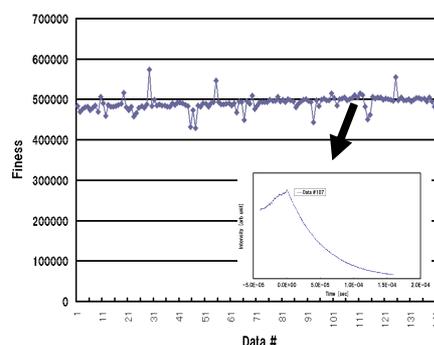


図1 今年度作製した 698nm 用ミラーのフィネス計測結果

### NTT グループ

京大グループによる三次元光格子に閉じ込められた <sup>174</sup>Yb 原子気体に対する超高分解能分光実験の結果を定量的に解析する計算方法の開発に成功した。従来から採用してきた NTT 独自の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を組み合わせることで、超流動-モット絶縁体転移に伴った分光スペクトルの形状変化 (スペクトルの分裂やスペクトル幅の広がりなど) を定量的に解析することが可能となった。京大グループの実験データと NTT グループの解析結果を比較することで、三次元ボース・ハバードモデルの有限温度での相図を幅広い領域に亘って探索できる道が開けた。

一方、光格子の高次のワニエ軌道を利用して、冷却フェルミ原子のスピン間にイジング相互作用を発生させる方法を理論提案した。フェッシュバツハ共鳴、ポストセレクション・スキーム、ペアワイズ・スキームを新たに導入することで、量子計算に有用なクラスター状態をミリ秒程度の短時間に高いフィデリティで生成できることを明らかにした。

これら以外にも、光格子中の三成分フェルミ原子気体が低温で示す新奇な量子相に関する理論解析 (NTT-1, NTT-3, NTT-4)、三体ロスに抗して巨大なボース凝縮体を生成させるための蒸発冷却の

最適化<sup>(NTT-5)</sup>などの成果を得ることができた。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

[KU-1] Yosuke Takasu, Yutaka Saito, Yoshiro Takahashi, Mateusz Borkowski, Roman Ciurylo, and Paul S. Julienne, Controlled Production of Sub-Radiant States of a Diatomic Molecule in an Optical Lattice, *Physical Review Letters*, 2012, (in press)

[KU-2] S. Kato, K. Shibata, R. Yamamoto, Y. Yoshikawa and Y. Takahashi, Optical magnetic resonance imaging with an ultra-narrow optical transition, *Applied Physics B* (online), 2011, (DOI: 10.1007/s00340-012-4893-0)

[KU-3] Mateusz Borkowski, Roman Ciurylo, Paul S. Julienne, Rekishu Yamazaki, Hideaki Hara, Katsunari Enomoto, Shintaro Taie, Seiji Sugawa, Yosuke Takasu, and Yoshiro Takahashi, Photoassociative production of ultracold heteronuclear ytterbium molecules, *Phys. Rev. A* 84, 030702(R) (2011.9.14) (DOI: 10.1103/PhysRevA.84.030702)

[KU-4] Seiji Sugawa, Rekishu Yamazaki, Shintaro Taie, and Yoshiro Takahashi, Bose-Einstein condensate in gases of rare atomic species, *Phys. Rev. A* 84, 011610(R) , 2011, (DOI:10.1103/PhysRevLett.91.040404)

[KU-5] Seiji Sugawa, Kensuke Inaba, Shintaro Taie, Rekisyu Yamazaki, Makoto Yamashita, and Yoshiro Takahashi, Interaction and filling-induced quantum phases of dual Mott insulators of bosons and fermions, *Nature Physics*, 2011 (DOI: 10.1038/NPHYS2028)

[KU-6] Hideaki Hara, Yosuke Takasu, Yoshifumi Yamaoka, John M. Doyle, and Yoshiro Takahashi, Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alkaline-Earth-Like Atoms, *Phys. Rev. Lett* 106, 205304-1-4, 2011, (DOI:10.1103/PhysRevLett.106.205304)

[NICT-1] A. Yamaguchi, N. Shiga, S. Nagano, Y. Li, H. Ishijima, H. Hachisu, M. Kumagai, and T. Ido: “Stability transfer between two clock lasers operating at different wavelengths for absolute frequency measurement of clock transition in  $^{87}\text{Sr}$ ” *Applied Physics Express* 5 022701 (2012). (DOI:10.1143/APEX.5.022701)

[NICT-2] Miho Fujieda, Motohiro Kumagai, Shigeo Nagano, Atsushi Yamaguchi, Hidekazu Hachisu, and Tetsuya Ido: “All-optical link for direct comparison of distant optical clocks” *Opt. Express* **19** 16498 (2011). (DOI:10.1364/OE.19.016498)

[NICT-3] Atsushi Yamaguchi, Miho Fujieda, Motohiro Kumagai, Hidekazu Hachisu, Shigeo Nagano, Ying Li, Tetsuya Ido, Tetsushi Takano, Masao Takamoto, and Hidetoshi Katori: “Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the  $10^{-16}$  Uncertainty” *Appl. Phys. Express* **4** 082203 (2011). (DOI: 10.1143/APEX.4.082203)

[NTT-1] Kensuke Inaba and Sei-ichiro Suga, “Color Superfluid and Trionic State of Attractive Three-Component Fermionic Atoms at Finite Temperatures”, *Modern Physics Letters B*, vol. 25, 987, 2011 (DOI:10.1142/S021798491102670X)

[NTT-2] Hitoshi Yoshizumi, Kensuke Inaba, Tomoko Kita and Sei-ichiro Suga, “Two-orbital Kondo effect in a quantum dot coupled to ferromagnetic leads”, *Phys. Rev. B*, vol.83, 155310, 2011 (DOI:10.1103/PhysRevB.83.155310)

[NTT-3] Sei-ichiro Suga and Kensuke Inaba, “Three-component Repulsive Fermionic Atoms in Optical Lattices at Finite Temperatures”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 273, 012016, 2011 (DOI:10.1088/1742-6596/273/1/012016)

[NTT-4] Shinya Miyatake, Kensuke Inaba and Sei-ichiro Suga, “Color superfluidity and trionic state of three-component lattice fermionic atoms”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 273, 012008, 2011 (DOI:10.1088/1742-6596/273/1/012008)

[NTT-5] Takahiko Shobu, Hironobu Yamaoka, Hiromitsu Imai, Atsuo Morinaga, and Makoto Yamashita, “Optimized evaporative cooling for sodium Bose-Einstein condensation against three-body loss”, *Physical Review A*, vol. 84, 033626, 2011 (DOI: 10.1103/PhysRevA.84.033626)

### (3-2) 知財出願

① 平成 23 年度特許出願件数(国内 0 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)