

「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」  
平成 20 年度採択研究代表者

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. 研究実施の概要

本年度は、各グループにおいて着実に進展があった。まず、京大グループでは、Yb 原子光格子実験により、モット絶縁体状態、バンド絶縁体状態を実現し、さらにボース・フェルミ混合系の振舞いを詳しく調べ、NTTグループの理論との比較によりその振舞いをほぼ理解することに成功した。また、薄型ガラスセル領域でBECを生成しそれを一次元光格子に導入して、磁場勾配を印加した状態で高分解能レーザー分光することに成功した。また、ほぼ単一原子を検出できる高感度蛍光検出系を開発した。また、スピンスクイズド状態をデコヒーレンスなく操作することに成功した。さらに、同時レーザー冷却したYb原子とLi原子の原子数や温度を測定し、真空度の改善を行い、同時光トラップすることに成功した。

NICT グループでは、まず、今後の研究の基盤となる $^{87}\text{Sr}$  光格子時計の開発に成功した。得られた中心周波数 429 228 004 229 867 (9) Hz はこれまでの計測値と一致しており、今後の見通しが立った。また、共振器鏡のブラウン運動から来る振動の影響を相対的に小さくすべく大型 (30cm) で従来にない形状の光共振器を設計し、予測値として1Hz 以下の線幅が実現する予定である。また、光格子時計における衝突シフトに関して、バッファーガス(希ガス)を導入した加熱セルを用いて精密飽和吸収分光を行い、数 2-3kHz 程度の衝突シフトを定量的に評価することに成功した。

航空電子グループでは、ミラーの反射率を高くするための損失改善実験を行い、従来技術で作製したミラーの反射率が 99.9974%だったものが、99.999%まで向上させることができた。また今後は、最終目標である反射率 99.9997%を達成するために、膜の分析を行い、損失の原因を究明しつつ、成膜プロセスの改善に取り組んでいく。

NTT グループでは、自己エネルギー汎関数法によるフェルミ原子気体の磁気相転移の解明、グッツヴィラー近似による実験結果の定量的解析(ボース・フェルミ混合原子気体系での量子相転移および Time-of-flight 像の観測結果)、さらには光超格子中のフェルミ原子を用いて量子もつれ

クラスター状態を生成する方法の提案といった成果が得られた。今後はこれらの成果をさらに発展させていく。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 「京大」グループ

① 研究分担グループ長: 高橋 義朗 (京都大学大学院、教授)

#### ② 研究項目

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

### (2) 「NICT」グループ

① 研究分担グループ長: 井戸 哲也 ((独)情報通信研究機構、主任研究員)

#### ② 研究項目

- (ア)  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計の構築
- (イ) 大型光共振器の設計・製作
- (ウ)  $^{88}\text{Sr}^1\text{S}_0-^3\text{P}_1$  時計遷移のバッファーガス衝突シフト及びブロードニングの計測

### (3) 「航空電子」グループ

① 研究分担グループ長: 江藤 和幸 (日本航空電子工業(株)、UV技術シニアマネージャー)

#### ② 研究項目

- (ア) 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 研究分担グループ長: 山下 眞 (NTT 物性科学基礎研究所、主任研究員)

#### ② 研究項目

- (ア) 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
- (イ) 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
- (ウ) 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

### § 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する。)

本研究では、先端光源として、ヘルツおよびサブヘルツという極めて線幅の狭い超安定な光源の可能性に着目し、超狭線幅光源を開発し、それをレーザー冷却された中性原子を光格子に導入した系に適用することにより、量子計算・光周波数標準といった究極的な量子操作・量子計測技術へ応用展開することを目指す。特に、2 電子系原子に共鳴する超狭線幅の光源を開発し、それを光格子中の量子縮退したイッテルビウム原子気体に適用することにより、個々の原子の究極的な量子制御技術の開拓やスピンスクイジング技術を応用した新しい量子計測技術の確立を目的とする。本年度はそのための本格的な研究を開始した。

まず、京大グループでは、Yb 原子光格子実験により、モット絶縁体状態、バンド絶縁体状態を実現した。さらに、引力相互作用および斥力相互作用するボース・フェルミ混合系を用意し、相互作用の違いによる原子系の振舞いの相違を、原子波干渉および光会合法により実験的に詳しく調べ、NTTグループの理論との比較によりその振舞いをほぼ理解することに成功した。また、フェルミ粒子についても、フェルミ粒子同位体混合を実現し、その同位体間の大きな引力相互作用による、集団運動の抑制を観測することに成功した。また、ボース粒子同位体混合系において、光フェシュバハ共鳴効果を観測し、フェルミ粒子同位体混合についても光会合分光を系統的に行い、多くの共鳴を観測することに成功した。さらに、BEC に対して光フェシュバハ共鳴効果を適用し、波長以下のスケールで空間的に相互作用を変調することに成功した。また、我々が考案した量子計算法<sup>KU-4)</sup>実現のために新たに構築した真空チャンバーを用いて、光ピンセットにより金属チャンバー領域から薄型ガラスセル領域に原子を移動し、薄型ガラスセル領域にてBECを生成することに成功し、さらにそれを一次元光格子に導入して、磁場勾配を印加した状態で高分解能レーザー分光することに成功した。また、ほぼ単一原子を検出できる高感度蛍光検出系、およびそのための安定な光源系を開発した。また、量子非破壊測定により生成したスピンスクイズド状態を、光を用いて高速にデコヒーレンスなく操作することに成功した<sup>KU-1)</sup>。さらに、同時レーザー冷却した Yb 原子と Li 原子の原子数や温度を測定し<sup>KU-2)</sup>、さらに今後の研究に向けて真空度の2桁程度の改善を行った。その結果、Li 原子と Yb 原子を同時に光トラップすることに成功した。

NICTグループでは、まず、今後の研究の基盤となる<sup>87</sup>Sr 光格子時計について、冷却原子を光格子ポテンシャルにロードして時計遷移を分光することに成功した。トラップ地点の残留磁場等まだブロードニングの要因を排除しきれていないためにスペクトル線幅こそまだまだ狭窄化の余地があるが、得られた中心周波数 429 228 004 229 868 (9)Hz は JILA、東大、SYRTE (仏)の計測値と一致し、またその測定の不確かさの支配的要因は測定の基準周波数としている(多数の商用 Cs 原子時計の平均で構成される)日本標準時によるものであり、今後の絶対周波数測定はこの不確かさを避けられる Cs 原子泉時計 (NICT-CsF1) との同時運用が必須となる状況に到達したと言える。また、今回の NICT の測定は日本発の Sr 光格子時計が上記の三つの研究機関のデータによって秒の二次表現として国際度量衡委員会によって採用されて以来、初めてそれを裏付ける4つめの研究所からのものとなり、Sr 光格子時計を光領域における原子時計として最もポピュラーなものとして認識させる効果をも見込める。

次に、新しいデザインの大型光共振器の設計を行った。現在レーザーの狭線幅化、換言すればレーザーのコヒーレンスそのものの極限はいかに光共振器に安定化するかではなく、いかに安定な光共振器を用意するか、にある。従来多く使われてきた共振器長 10cm 程度の光共振器は共振器鏡のブラウン運動から来る振動によってその安定度が制限されていることが近年明らかになり、我々は相対的にその影響を小さくすべく大型 (30cm) で従来にない新しい形状の光共振器を設計した<sup>NICT-2)</sup>。大型の光共振器の設計では共振器の支持部分から伝搬する振動による共振器長の変化を如何に抑えるかが課題となる。我々の設計では共振器の支持部及びベースプレートを一体にした斬新な形状としており、これによって従来の支持方法では定量的予測が難しかった地面振動の伝達率についてその予測を可能とし、またそれに依拠して有限要素法を実行して振動の共振器長に及ぼす影響が最小になるように最適化している。設計予測値としては、通常の実験室環境での振動レベルによるスペクトル広がり 0.3Hz、熱雑音による広がり 30mHz(石英基板)、130mHz (ULE 基板)としており、1Hz 以下の線幅が実現する予定である。

また、光原子時計については現在最高精度のものにおいてはその精度は 17 桁の領域に到達している。これに伴い従来無視されてきた多様な系統誤差の評価が要請されつつある。光格子時計における衝突シフトについてはこれまで Sr原子同士の衝突によるシフトは議論されてきたが、真空槽内の残留ガスとの衝突については殆ど議論されていない。我々は<sup>88</sup>Sr原子の $^1S_0-^3P_1$ 遷移に着目し、加熱セルを用いて精密飽和吸収分光を行い、セル内にバッファーガス(希ガス)を導入することで希ガスと Sr 原子によるわずかな数 2-3kHz 程度の衝突シフトを定量的に評価することに成功した<sup>NICT-1)</sup>。また得られた結果は impact approximation による半古典的取り扱いでの理論値と比較し、実験は理論よりも少ないシフト量と多いブロードニングを示すことが確認された。これは飽和吸収分光の信号に寄与する、光軸に垂直に運動する原子が強いバッファーガス衝突によって突然失われることによる、コヒーレンスの消失から説明出来る。

超狭線幅光源の実現のためには超高反射ミラー(最終目標 反射率 99.9997%)が必要とされている。航空電子グループでは、この超高反射ミラーを作製するための手法としてイオンビームスパッタ法を採用している。反射率を極限まで高めるためには、損失を極限まで低減することが必要となる。このうち吸収損失については、ミラーの形成過程においてできる膜中の欠陥や不純物が原因であるため、これらを低減するために製造条件(イオンビームの電流や酸素流量等)を最適化していくことが求められる。本年度は、まず従来条件で作製した高反射ミラーの反射率を測定した。結果は

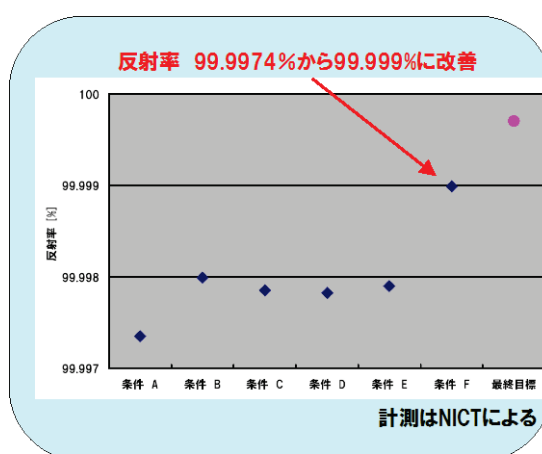


図1 成膜条件の違いによる多層膜鏡の反射率の変化

反射率 99.9974%であった。その後成膜条件の最適化の実験を開始し、現在までに反射率 99.999%までが得られており、改善が進んでいることがわかる。なお、反射率の計測は NICT がおこ

なったものである。

また今年度は、薄膜の屈折率を計測できるようにするために分光エリプソメータを導入した。薄膜の屈折率は製造条件により異なるが、図2に一例として SiO<sub>2</sub> 薄膜と Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜の屈折率の計測結果を示す。今後いろいろな製造条件における屈折率を測定し、多層膜ミラーの形成に適用していく。

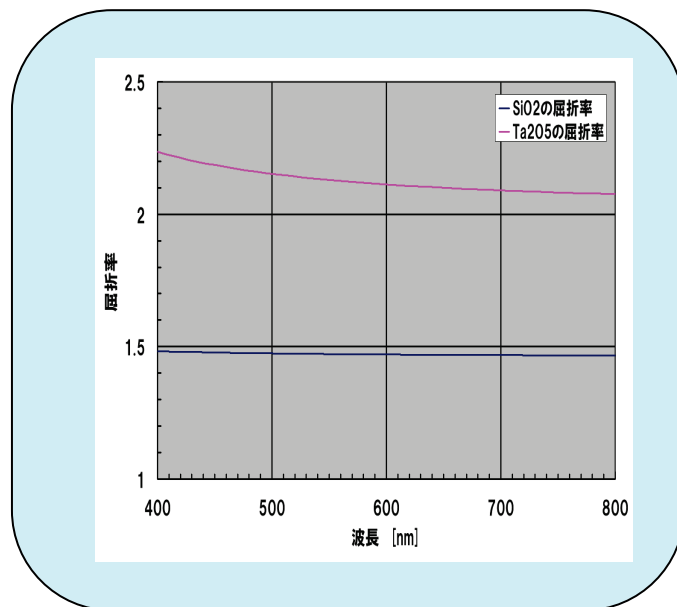


図2 分光エリプソメータによる屈折率の測定結果

NTTグループでは光格子に閉じ込められた冷却原子に対する量子状態制御理論の一環として、自己エネルギー汎関数法を用いて冷却フェルミ原子気体の磁気相転移の解析を行った。これは三成分フェルミ原子気体での量子相転移の解明に用いた理論<sup>(NTT-1)</sup>をより実験に近い閉じ込めポテンシャルのある二成分フェルミ原子系に拡張したもので、有限温度や原子間相互作用の効果を正確に取り扱うことができるため、実験に先駆けて反強磁性転移の臨界温度を求めることに成功した。また NTT グループがこれまで独自に開発してきたグッツヴィラー近似に基づく計算手法がさらに進展し、京大・高橋グループの Yb 原子系の実験結果(ボース・フェルミ混合系での量子相転移、および Time-of-flight 像の観測データ)を定量的に解析することが可能となった。これと並行して、一次元光格子に限定されるが密度行列繰り込み群法を用いて、量子状態制御の観点から今後重要となる光超格子中のフェルミ原子気体の量子相転移<sup>(NTT-2)</sup>や非断熱的ダイナミクス<sup>(NTT-3)</sup>を明らかにした。また、一方で、光格子中の冷却原子を量子計算機へ応用するための理論解析も進めており、実験でのパラメータを考慮して、実現可能性の高い量子計算スキームを探索している。

## § 4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ● 論文詳細情報

- [KU-1] R. Namiki, “Non-Gaussian Entangled States and Entangled Orthonormal Basis”  
J.Phys.Soc.Jpn.79,013001 (2010) 10.1143/JPSJ.79.013001.
- [KU-2] T. Takano, S. Tanaka, R. Namiki, and Y. Takahashi, “Manipulation of Nonclassical Atomic Spin States” Phys. Rev. Lett 104,013602-1-4 (2010)10.1103/Phys. Rev. Lett.104.013602.
- [KU-3] K. Azuma, N. Sota, R. Namiki, S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi and N. Imoto, “Optimal entanglement generation for efficient hybrid quantum repeaters”  
Phys. Rev. A 80, 060303(R) (2009) 10.1103/Phys. Rev. A.80.060303.
- [KU-4] M. Okano, H. Hara, M. Muramatsu, K. Doi, S. Uetake, Y. Takasu, and Y. Takahashi, “Simultaneous magneto-optical trapping of lithium and ytterbium atoms towards production of ultracold polar molecules”, Applied Physics B 98, 691 (2009) 10.1007/s00340-009-3728-0.
- [KU-5] K. Shibata, S. Kato, A. Yamaguchi, S. Uetake, and Y. Takahashi, “A scalable quantum computer with an ultranarrow optical transition of ultracold neutral atoms in an optical lattice”, Applied Physics B 97,753 (2009) 10.1007/s00340-009-3696-4.
- [KU-6] Y. Takasu and Y. Takahashi, “Quantum degenerate gases of ytterbium atoms”, (invited paper) J. Phys. Soc. Jpn. 78, 012001-1-11 (2009) 10.1143/JPSJ.78.012001
- [KU-7] M. Borkowski, R. Ciurylo, P. S. Julienne, S. Tojo, K.Enomoto, and Y. Takahashi, “Line shapes of optical Feshbach resonances near the intercombination transition of bosonic ytterbium” Phys. Rev. A 80, 012715-1-14 (2009) 10.1103/Phys. Rev. A.80.012715.
- [KU-8] M. Sato, Y. Takahashi, and S. Fujimoto, “Non-Abelian Topological Order in s-Wave Superfluids of Ultracold Fermionic Atoms” Phys. Rev. Lett 103, 020401-1-4 (2009.7.6)  
10.1103/PhysRevLett.103.020401.
- [KU-9] S. Uetake, K. Matsubara, H. Ito, K. Hayasaka and M. Hosokawa,  
“Frequency stability measurement of a transfer-cavity-stabilized diode laser by using an optical frequency comb” Appl. Phys. B 97, 413 -419(2009) 10.1007/s00340-009-3619-4.
- [NICT-1] N. Shiga, Y. Li, H. Ito, S. Nagano, T. Ido, K. Bielska, R. S. Trawinski, R. Ciurylo: “Buffer-gas-induced collision shift for the  $^{88}\text{Sr } ^1S_0\text{-}^3P_1$  clock transition” Phys. Rev. A 80, 030501(R) (2009) 10.1103/Phys. Rev. A.80.030501.
- [NICT-2]M. Koide and T. Ido, “Design of monolithic rectangular cavity of 30cm length”, submitted to Jpn. J. Appl. Phys.
- [NTT-1]S. Miyatake, K. Inaba, and S. Suga, “Three-component fermionic atoms with repulsive interaction in optical lattices”, Phys. Rev. A 81, 021603 (R) (2010)  
10.1103/PhysRevA.81.021603.

[NTT-2]K. Inaba and S. Suga, “Finite-temperature properties of attractive three-component fermionic atoms in optical lattices”, *Phys. Rev. A* 80, 041602(R) (2009) 10.1103/PhysRevA.80.041602.

[NTT-3]A. Yamamoto, M. Yamashita, and N. Kawakami, “Trapped ultracold fermions in double-well optical lattices”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 78, 124001 (2009) 10.1143/JPSJ.78.124001.

[NTT-4]A. Yamamoto, M. Yamashita, and N. Kawakami, “Nonadiabatic dynamics of ultracold fermions in optical superlattices”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 78, 123002 (2009) 10.1143/JPSJ.78.123002.