

「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2電子系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している。

本年度はそのための準備期間と位置づけ、本格的な研究を開始する準備を整えることを中心に進めた。京大グループでは Yb 原子光格子実験、および超狭線幅光源の整備を主眼において準備をすすめた。まず、光源の安定化に必要な超低膨張ガラスを準備した。今後これを用いて約 100 Hz 程度の線幅を達成する見通しである。また、高安定な磁場勾配発生器と光格子とが一体となった装置を開発することにより、単一格子点へのアクセスが可能になるが、各種安定性・制御性を兼ね備えた装置の設計・プロトタイプ装置作成を行ない、その性能を光共振器を用いて評価した。さらに、空間フィルタリングなどの手法を駆使して、光格子にトラップされた原子集団に対する吸収観測に成功した。これにより、光格子中原子のスピンスクイジング実現のめどが立った。

また、NICT グループでは、レーザー冷却・トラップによって冷却原子を得ること、そして狭線幅光源について熱雑音でその線幅の狭窄化が制限されない共振器の設計を行なった。これは、今後のレーザー周波数安定化に直結する。また、レーザー冷却用の光源を利用して加熱セルベースの精密飽和吸収分光を行った。

航空電子グループでは、従来技術の限界を把握するために、波長 698nm 用のキャビティを作製した。作製したキャビティは、現在NICTで評価を進めている。また、ミラーの損失の主要因特定のための計測を行った。従来技術ではS/Nが悪いため、これを今後改善していくことが必要であることがわかった。

理論の NTT グループでは、京大グループの1次元光格子の実験結果の理論解析に成功しただけでなく、即戦力メンバーの増員を図り、平成 21 年 4 月からは 2 名が加わる予定である。新規メンバーとの研究はすでに開始しており、今後は京大・高橋グループとの緊密な連携を維持しながら、光格子中冷却原子気体の量子物性の解明、さらには量子情報処理への応用を目指す。

2. 研究実施内容

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準備期間と位置づけ、本格的な研究を開始する準備を整えることを中心に進めた。

まず、京大グループでは、イッテルビウム原子を対象とした実験の準備、特に、共鳴線幅の非常に狭い光学遷移の励起用の高安定な光源の準備を新たに行なった。1014 nm の波長の光源作製に必要な超高安定な光共振器を用意し、その温度安定度を改善した真空容器を新たに設計した。また、電気フィードバック系の大幅な改良も行なった。レーザー線幅は、同様に作成した2台のレーザーのビートを測定することにより最終的には評価されるが、冷却原子を用いた簡便な方法として、図1に示すような TOF-ホールバーニング法とでも呼ぶべき新しい方法を見出した。超低温まで原子を冷却したのち、トラップから開放してその間に、原子をレーザーで励起すると、レーザー線幅に対応した速度成分を持った原子集団のみ、励起され、「ホール」として検出されるというものである。これによりレーザー線幅を評価して、長期安定度も含めて現在 3kHz 以下であることを確認することができた。

また、高安定な磁場勾配発生器と光格子とが一体となった装置を試作した。機械的安定性、温度安定性、光アクセス、制御性を全て兼ね備えた装置の設計・プロタイプ装置作成を行ない、その性能を光共振器を用いて評価し、おおむね良好な結果を得ることができた。さらに、本研究に用いる特殊な真空チャンバーを作成し、実際、その装置を用いて、イッテルビウム原子のレーザー冷却、光トラップに成功した。さらに、重要なステップである、光ピンセットによる移動にも成功した。

また、ファラデー回転によるスピンスクイジング技術¹⁾を、空間フィルタリングなどの手法を駆使して、光格子にトラップされた原子集団に適用する準備を行なった。実際、空間フィルタリングされた光に対して、原子による 70%近い吸収を確認することができた。そして、さらに、共鳴から外れた円偏光した光によりスピンを回転させる技術、いわゆる擬似磁場効果を実際にレーザー冷却された¹⁷¹Yb原子に適用し、360度以上の回転を実現し、これを用いて非古典的集団原子スピン状態に対する初めての量子トモグラフィーを実現した。

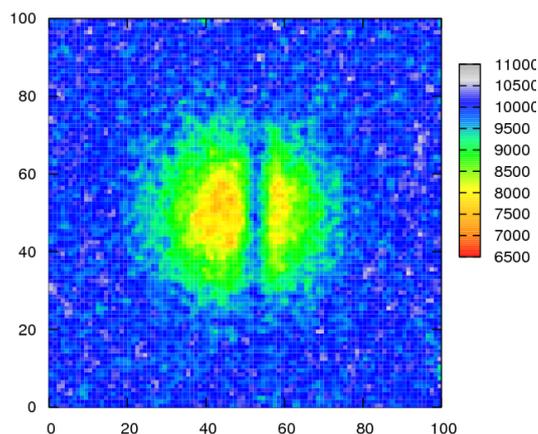


図 1

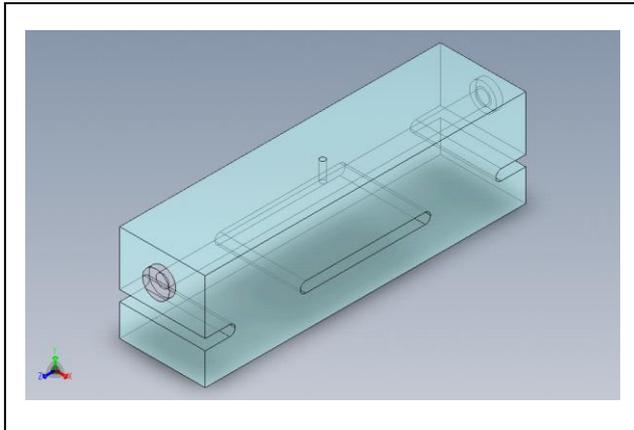


図2

(H21)中の時計動作確認に向けて着実に進歩している。狭線幅光源の開発については、本年度はその心臓部になる光共振器について主に研究を進めた。共振器を支持している部位から到来する振動が共振器長に影響を及ぼしにくい形状を図2のように決定した。ここでは、共振器を下の土台との一体構造として下駄の歯のようなもので支えることによって、「両端部分が垂れて外側にせり出す効果」と「真ん中部分が落ち込むことによって両端の上部を中心へ向かって引っ張る効果」を相殺させて最終的に共振器長が動かないような構造としている。細部の長さについては有限要素法によって最適値を確定させ、新年度早々にも発注作業に取りかかることが可能となった。また、原子時計において近い将来大きな問題となりうる真空槽内のバックグラウンドガスによる衝突シフトについて、加熱セルにおいてバッファーガスが 5mTorr 程度ある状況で 411THz の遷移において 2×10^{11} 分の 1 に相当する 2kHz の遷移を NICT にて得られる標準周波数に安定化された周波数コムによってリアルタイムに検出して、バッファーガスによるシフトを確認すると同時に、その理論的説明を試みた。これらの結果および開発ノウハウは全て、研究代表者の Yb 原子を用いた研究に今後大いに活かされるものである。

航空電子グループは、従来技術によりスーパーポリッシュされた合成石英基板上に波長 698nm 用の多層膜ミラーを成膜し、クリアセラム製のスペーサにオプティカルコンタクトすることでキャビティ

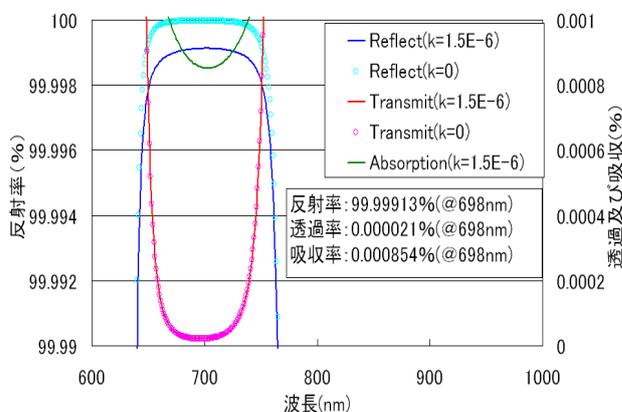


図3

さらに、YbLi 分子生成の準備のための光源開発・レーザー冷却実験も行い、イッテルビウム原子とリチウム原子を同時に磁気光学トラップすることに成功した。

NICT グループでは、ストロンチウム原子の光格子時計については多数をトラップするためのリポンプ光やフェルミ同位体をトラップするための光源の準備を進め、最終的には二段階冷却・トラップ迄成功し、予定している次年度

キャビティを作製した。このキャビティの評価は現在NICTで進めている。図3に作製したミラーの反射率と透過率の設計データを示す。低屈折率層材料として SiO_2 、高屈折率層材料として Ta_2O_5 を選択した。

この材料は、重力波アンテナ用ミラー(波長 $1.06 \mu\text{m}$ 用)等で実績のある材料で、698nm での屈折率はそれぞれ 1.458 と 2.082 である。消衰係数は、 SiO_2 、 Ta_2O_5 ともに 0 の場合と 1.5×10^{-6} の場合の 2 通りを計算した。また層数は 45 層とした。

消衰係数が0の時、反射率は99.99998% (キャビティーのフィネスにすると15,000,000)であるが、 1.5×10^{-6} の時には99.9991%(フィネス350,000)に低下する。この計算では吸収損失のみ考慮しているが、損失として他にミラー表面が凹凸であることによる散乱損失があり、これらの損失を極限まで低減することが重要であることがわかる。

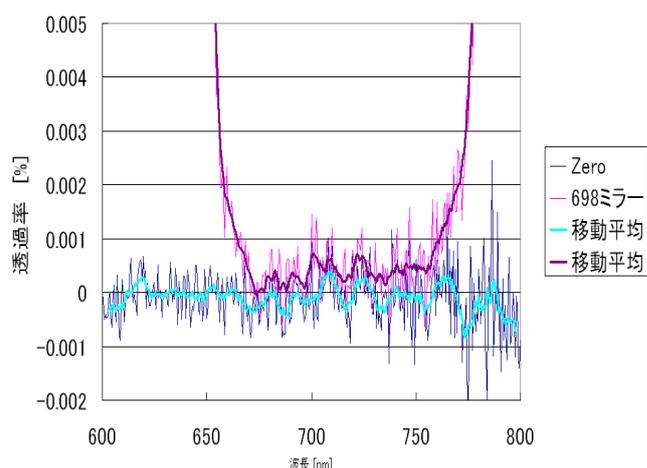


図4

このミラーの透過率を従来技術である分光光度計を使って測定した結果が図4である。

Zero は、分光光度計のサンプル位置に遮蔽板を置いた時に得られたデータである。これから、S/Nが悪く ppm オーダーでの測定が困難であることがわかる。

H21年度以降、これらの測定精度を高くし、さらには散乱損失を測定することで、吸収損失(1-反射率-透過率-散乱率)を求め、損失の主要因を特定しつつ、ミラーの製造技術の改善を図っていく。

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、1次元光格子中の ^{174}Yb ボース凝縮体に関する京大・高橋グループの実験を対象とした定量的解析を行った。光格子によってパンケーキ型のボース凝縮体が1次元的に配列された実験系を記述するため、原子間の相互作用や原子の飛び移り積分がサイトに依存する“拡張された1次元ボース・ハバードモデル”を提案し、このモデルの基底状態をグッツヴィラー近似に基づいた強力な解析手法²⁾を用いて数値的に求めた。その結果、光格子ポテンシャルが深くなるにつれてYb原子間に働く相互作用によってサイト毎の原子数揺らぎが抑制され、数スクイーズド状態が形成されることが明らかになった。また、collision shiftと呼ばれる原子間衝突による微細準位のシフトを考慮した高分解分光スペクトルの解析からは、光格子ポテンシャルが深くなるにつれてスペクトル幅は広がり、またその形状が非対称になることが示された。これらの解析結果は京大・高橋グループの実験結果とも良い一致を示し、我々の解析手法が定量性に優れることが実証された。

一方で、光格子中Yb原子を量子計算機へ応用するための理論検討にも着手している。京大・高橋グループによるこれまでの研究成果を吟味し、さらに量子もつれクラスター状態理論等を参考にしながら、Yb原子の特性を生かした量子計算アルゴリズムの提案を試みている。

3. 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

- ・ 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

- ・ ストロンチウム光格子時計の開発
- ・ 超狭線幅光源の開発

(3)「航空電子」グループ

①研究分担グループ長:伊藤 和彦 (日本航空電子工業株式会社、薄膜技術シニアマネージャ)

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

- ・ 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。

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. T. Takano, M. Fuyama, R. Namiki, and Y. Takahashi “Spin squeezing of a cold atomic ensemble with the nuclear spin of one-half ” Phys. Rev. Lett 102, 033601-1-4 ,2009.1.22
2. M. Yamashita and M. W. Jack, “Mott-insulator shells in the three-dimensional Bose-Hubbard model with harmonic confinement”, Phys. Rev. A 79, 023609 (2009.2.6).

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)