

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

平成 17 年度採択研究代表者

香取 秀俊

(東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 助教授)

「極低温原子を用いる量子計測法の開拓」

## 1. 研究実施の概要

時計遷移におけるシュタルクシフトをキャンセルする光格子中の原子を用いた原子時計—光格子時計—により、18 桁の周波数安定度(計測時間 1 秒)および正確さを達成することを目標としている。現在までは、1次元の光格子中において高精密分光のデモンストレーションを行い、14 桁のレベルにおいて、本スキームが有用であることが分かった。次のステップとしては、1次元光格子時計を用いて性能向上を図りつつ、3次元光格子時計への拡張を行い、1次元光格子との周波数比較により衝突シフトの評価を行う。さらに、Sr 原子で開発した技術をもとに、異種原子(Yb、Hg 原子)への拡張を行い、それぞれの時計間の周波数比較により、微細構造定数の時間変動を評価する。これらの実現を目指し、3次元光格子時計、Yb 光格子時計、Hg 光格子時計の開発を同時並行で行う。

一方、シュタルク原子チップの研究では、これまで開発してきた 50 ミクロンの電極構造のチップの微細化に挑む。数ミクロンの電極構造が実現すれば、数ボルトの電圧印加により原子制御が可能になるために、電子集積回路による原子集積回路の直接駆動、それら集積回路の複合化が実現する。このほか、双極子相互作用を介した原子の相互作用制御により、2 原子間の量子相関形成の手法を探り、シュタルク原子チップによる量子コンピューティング IC 実現に向けた要素技術の開発を行う。

## 2. 研究実施内容

光格子時計：

Sr 光格子時計の実験では、これまで開発してきた1次元光格子時計システムを用い、ラムゼー分光による魔法波長の精密計測のデモンストレーションを行った。この分光計測では、被観測原子数の規格化により、量子射影ノイズ限界に近づく安定度向上を実現した。これは従来に比べ、1 桁の安定度向上となっている。一方、現在開発を進めている 3 次元光格子時計システムでは、実験系の整備が完了し、光格子による原子の捕獲に成功した。次の段階として、時計遷移の分光実験に着手した。

Yb 光格子時計の実験では、Sr 光格子時計との周波数比較の観点から、同一の真空装置内で

Sr/Yb 原子をトラップし、同一空間中で 2 種の光格子時計を構成する『デュアル光格子時計』の開発を目指す。『デュアル光格子時計』の構成をとることにより、2 種原子に対して同じ符号で加わる、重力シフト、黒体シフト等の環境からの摂動を相殺・軽減し、 $10^{-18}$  レベルの精度での周波数比較の困難の一部を緩和する。また、実験的にも Sr/Yb 原子は、飽和蒸気圧が近い値であり、原子オーブンの共有も可能である利点がある。今年度は、Yb 光格子時計に必要なレーザー光源(許容遷移冷却用、禁制遷移冷却用、時計遷移観測用)の開発を行った。さらに開発した光源を用いて、許容遷移における Yb 原子の磁気光学トラップに成功し、同一空間中での Sr/Yb 原子の『デュアル磁気光学トラップ』に成功した。

Hg 光格子時計の実験では、禁制遷移冷却用光源(2段階の第二高調波発生)の開発を行い、真空装置の設計、導入が完了した。

産総研においては、Yb 原子時計遷移分光用の光源(578nm)を開発し、Yb 光格子時計の実験系を構築することが H17 年度の研究内容である。さらに、GPS 搬送波位相方式周波数比較法により、つくば(産総研)ー本郷(東大)間において、高精度な周波数比較法を構築することも目標とする。

578nm 時計遷移分光用の光源に関しては、従来色素レーザーでしか得られない波長帯だったので、色素レーザーの不安定性を考慮すると新しい光源の開発が必要であった。我々は、周波数的に安定な固体レーザー及びファイバーレーザーによる和周波光源を開発した。さらに、導波路型の非線形結晶を導入することにより、光の閉じ込め効果を高め、高効率な和周波発生を実現した。また、Yb 光格子時計の根幹部分である MOT 用の真空装置を完成させた(図1)。真空テストの結果、格子時計の実験に必要な真空度に到達していることがわかった。さらに、Yb 許容遷移に対応する波長 399nm の外部共振器半導体レーザーシステムを完成させた(図2)。この光源を利用して、Yb 放電管に対して波長安定化を施した。上記真空装置において Yb 原子線を生成し、それに直交して波長 399nm の共鳴光を照射して、その蛍光も観察できた。

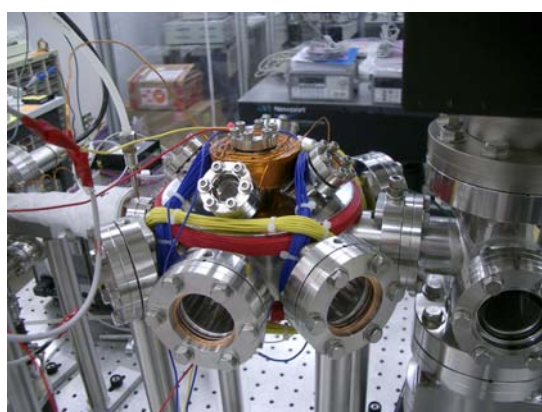


図1 MOT 用真空装置

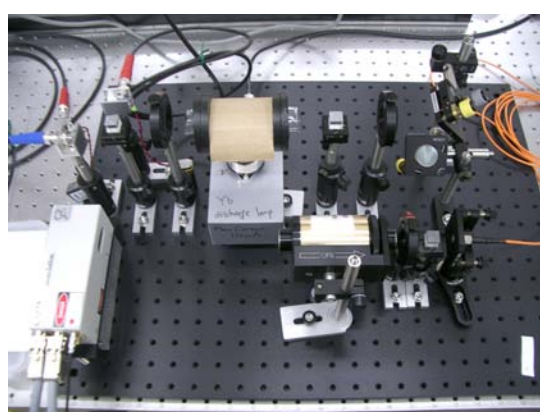


図2 399nm レーザシステム

一方、周波 GPS 搬送波位相法により、東大(本郷)に設置した高安定水晶発振器と産総研(つくば)の水素メーザ発振器の間の高精度周波数比較システムの構築を行った。産総研におけるシス

テム確認受信実験では、1秒における時刻比較精度として数psが得られており、周波数比較としては、平均化時間 10,000 秒で  $10^{-15}$  程度のシステム雑音で比較できることが実証できつつある。本システムのデータ解析には、JPL で開発された解析ソフトである“GIPSY”を利用している。

シュタルク原子チップ：

ストロンチウム  $^3P_2$  準安定状態原子を量子ビットとして用いるシュタルク原子チップの開発を目指した。この実現に向けて必要な技術は(1) $^3P_2$  状態原子のシュタルクトラップの実現、(2)単一原子観測と 2 準位間の状態制御、である。今期は(1)の実現に向けてシュタルクトラップへの磁場による原子ロード手法の開発を進めた。この予備実験として、真空中に配置した磁場トラップ用導線の電流磁場を使って冷却原子を作成した。(2)の実現に向けて、現行のシュタルクトラップ中での単一原子観測実験を進めた。

### 3. 研究実施体制

「東大」グループ

①研究分担グループ長：香取 秀俊（東京大学大学院工学系研究科、物理工学専攻、助教授）

②研究項目：

研究実施項目 1：Sr、Hg/Yb 光格子時計の構築と精度評価

概要：現在行っている Sr 光格子時計の高精度化をはかるとともに、新たに Hg または Yb 光格子時計の実験系を構築し、2 種の光格子時計の同時運転を行う。2 種の光格子時計の周波数比較をサブヘルツレベルで実現することにより、相対精度  $10^{-16} \sim 10^{-17}$  で光格子時計の不確かさの評価を行うとともに、微細構造定数の恒常性の検証を行う。

研究実施項目 2：シュタルク原子チップの研究

概要：Sr 原子(Hg/Yb 原子)を用いるシュタルク原子チップの開発を行う。qubit のデコヒーレンスの評価、原子のエンタングル状態の操作を通して、極限量子計測と量子情報処理技術との接点を探る。

「産総研」グループ

①研究分担グループ長：洪 鋒雷（産総研波長標準研究室、主任研究員）

②研究項目：

研究実施項目 1：Yb 光格子時計の構築と精度評価

概要：Yb 原子時計遷移分光用の 1 Hz スペクトル線幅の光源(578nm)を開発し、Yb 光格子時計の実験系を構築する。魔法波長を決定した上で、光周波数コムを用いて遷移周波数の精密測定を行う。さらに、

つくば（産総研）－本郷（東大）間の高精度周波数計測ネットワークを利用して、Yb-Sr、Yb-Hg の光格子時計同士で相互比較を行う。

研究実施項目 2：高精度周波数計測ネットワークの研究

概要：光周波数コムの高精度化を行うことにより、正確さと安定度を損なわずに、光－光、光－マイクロ波の周波数リンクを実現する。GPS 搬送波位相方式周波数比較法により、つくば（産総研）－本郷（東大）間において、高精度な ( $10^{-15}$ @3h) 周波数比較法を構築する。