

「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・准教授

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—による 18 桁の周波数計測の実現可能性を実験的に評価することを本研究の目標とする。19 年度には Sr 原子で「1 次元・3 次元光格子時計」の周波数比較を初めて実現し、(1)パウリの排他律として知られる量子力学的な性質を巧みに利用することで原子間の相互作用を排除する「1 次元光格子時計」と(2)ボーズ粒子のもつバンチング特性を光格子ポテンシャルによって排除する「3 次元光格子時計」が、光格子時計の究極の形態であることを示した。この周波数比較によって平均時間 2,000 秒で 5×10^{-16} の安定度を達成した。また、光ファイバー及び GPS 搬送波位相を用いた東大—産総研(つくば)間の高精度周波数リンクを実現し、光格子時計の絶対周波数測定を行った。一方、光格子時計手法の異種原子への拡張、それらを用いた微細構造定数の時間変動の評価の観点から、Yb/Sr デュアル光格子時計、Hg 光格子時計の開発を進めている。このうち、Hg 原子時計の開発では、その心臓部ともいえる中性 Hg 原子の磁気光学トラップに世界で初めて成功した。これを用いて、20 年度中には Hg の光格子分光を目指す。

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 $50 \mu\text{m}$ の電極構造のチップの微細化に挑み、実際に $10 \mu\text{m}$ 電極の格子構造のシュタルクチップを作成し、実験を開始した。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るため、Sr 原子の中赤外遷移 $2.9 \mu\text{m}$ に対応する光源開発を行った。

2. 研究実施内容

1) 「1 次元・3 次元光格子時計」の同時運転と周波数比較

超高精度原子時計を実現する上での大きな挑戦の一つは、原子間の相互作用を徹底的に排

除することである。これを実現するためには、(i) 1次元光格子を用い複数個原子をパンケーキ状のポテンシャルに捕獲し、「パウリの排他律」として知られるフェルミ粒子の量子力学的な性質を巧みに利用することで、原子間の相互作用を排除する「偏極・1次元光格子時計」と、(ii) ボーズ粒子のもつバンディング特性を光格子ポテンシャルによって排除する「3次元光格子時計」が有効である。これらを、実現する2台の光格子時計を構築し、同時運転することによってその特性評価を行った。この結果、国際原子時を凌駕する 5×10^{-16} の不確かさで2台の光格子時計の安定度を評価した。これは、光格子時計の相互評価という観点では世界初の試みである。

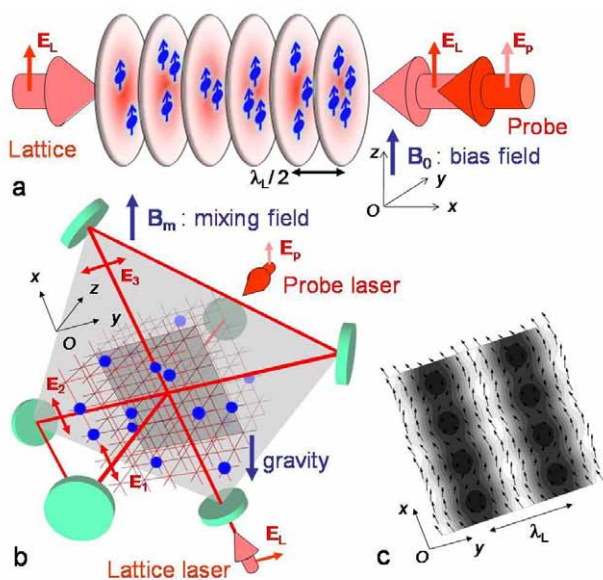


図 1: 光格子時計の幾何学的形状(a) スピン偏極 1次元光格子時計 (b)3次元光格子時計 (c) 3次元光格子電場のベクトルプロット。

2) Hg 原子の磁気光学トラップ: 光格子時計に向けて

原子パラメーターを大きく異にする原子種による光格子時計の実現と相互比較は、光格子時計手法の評価に不可欠であるばかりか、特に、原子核電荷 Z が大きく異なる2種の原子時計の精密比較は、それらのスペクトルの相対論的補正項 $\propto \alpha^2 Z^2$ を通して、超微細構造定数 α の恒常性の実験的議論が可能になるため物理的にも興味深い。我々は、 Z の大きな水銀原子に着目し研究を開始し、19年度には、光格子時計実現に向けた最初のステップである、磁気光学トラップによる極低温水銀原子の生成に世界で初めて成功した。水銀原子はこれまでにレーザー冷却された原子種の中でも、安定同位体としては最大の Z をもつ原子であり、 Z の大きさを武器とする EDM 測定等の精密計測の観点からも、この成功の意義は大きい。

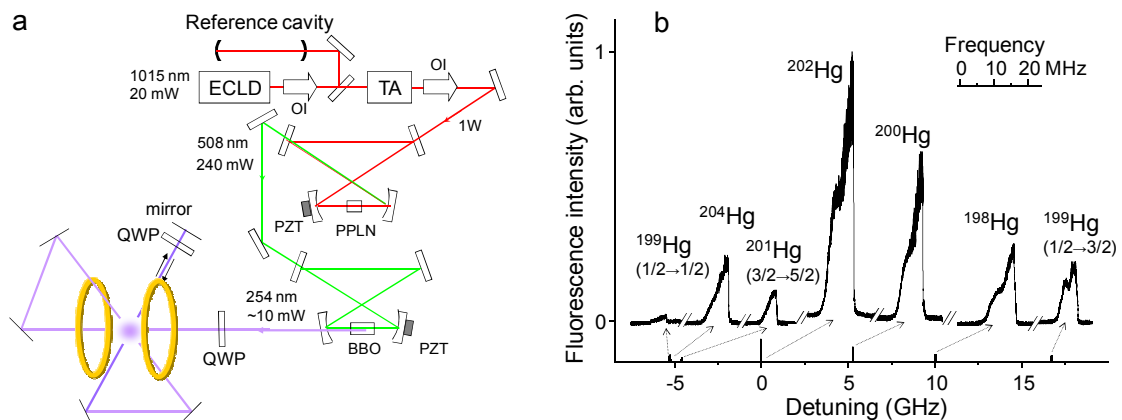


図2: a 水銀原子磁気光学トラップの実験配置。b 水銀原子の磁気光学トラップスペクトル。ボソン、フェルミオンを含む6種の安定同位体を $50 \mu\text{K}$ まで冷却、分離トラップしている。

3) 高精度周波数リンクによる光格子時計の絶対周波数計測:

東大(本郷)と産総研(つくば)との間の高精度時間周波数比較手段として、今年度は新たに光ファイバー(110km)による周波数リンクを導入した。光ファイバーによる周波数リンクは、伝送光にマイクロ波の基準信号を変調としてのせるタイプと、伝送光のキャリア周波数をそのまま基準信号として用いるタイプの2つの方式を用いた。また、従来のGPS搬送波位相方式の周波数リンクについても新しい解析ソフトウェアを開発し、改善を行った。さらに、水素メーザーだけではなく、産総研で開発された原子泉方式のセシウム原子時計、液体ヘリウムで冷却した高安定サファイアマイクロ波発振器及びファイバー光コムなど高精密度周波数計測の道具を総動員して、Sr光格子時計の絶対周波数計測システムを構築した(図3)。

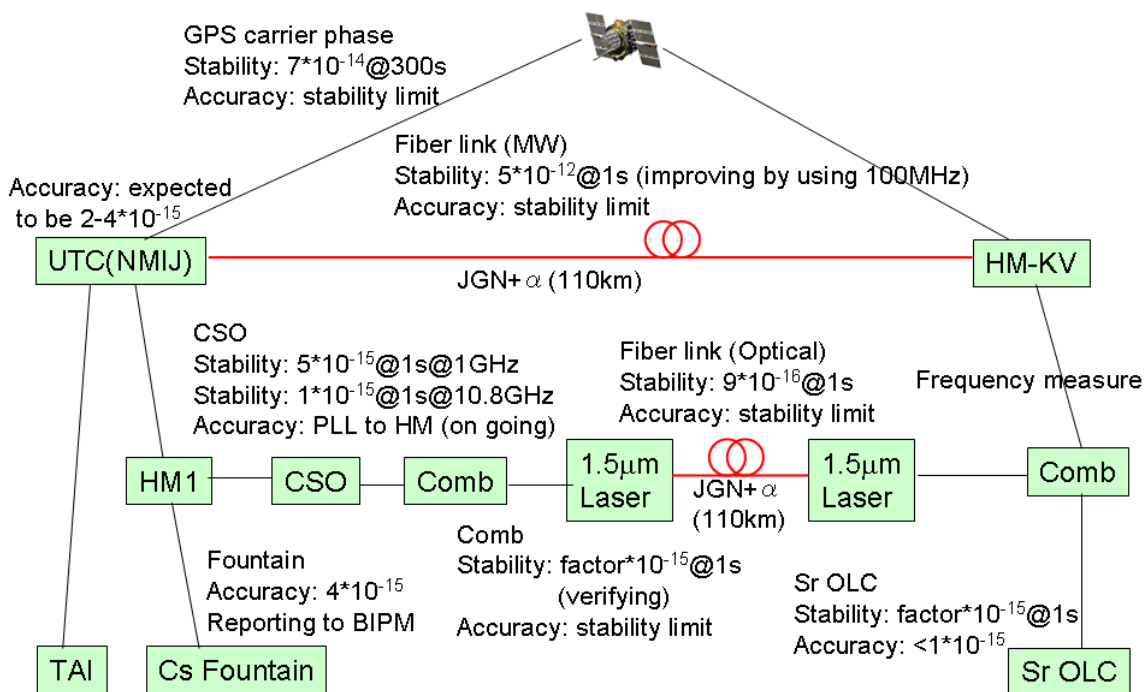


図 3: 光ファイバー及び GPS 搬送波位相を用いた東大ー産総研(つくば)間の高精度周波数リンク

3. 研究実施体制

(1)「東大」グループ

① 研究者名: 香取 秀俊(東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻)

② 研究項目

- Sr、Hg/Yb 光格子時計の構築と精度評価
- シュタルク原子チップの研究

(2)「産総研」グループ

① 研究者名: 洪 鋒雷(波長標準研究室)

② 研究項目

- Yb 光格子時計の構築と精度評価
- 高精度周波数計測ネットワークの研究

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

[1] H. Hachisu, K. Miyagishi, S. G. Porsev, A. Derevianko, V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, M. Takamoto, and H. Katori, "Trapping of Neutral Mercury Atoms and Prospects for Optical Lattice Clocks," *Phys. Rev. Lett.* **100**, 053001 (2008)