

「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 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。18 年度には Sr 原子で「偏極光格子時計」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とともに、(2)ゼーマンシフトの評価手法を確立し、時計の相対的不確かさ 1.2×10^{-15} を実現した。一方、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手法を確立しその絶対周波数計測を行った。この成果は 2006 年 10 月の、国際度量衡委員会での Sr 光格子時計の「秒の二次表現」採択に大きく寄与した。このほか、3 次元光格子時計が稼動を開始し、3 次元・1 次元光格子時計の周波数比較が進行中であり、19 年度中に 10^{-16} 台での安定度評価を目指す。

また光格子時計の手法の異種原子(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、Yb 光格子時計、Hg 光格子時計の開発を同時並行して行う。

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

1) 偏極光格子時計の実現:

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。光格子時計のアイデアのひとつは、3 次元の光格子によって原子を隔離することによってこの衝突を抑制することであったが、3 次元光格子の構成はテクニカルに煩雑であると

もに、原子のトラップされる光格子サイトの偏光の制御が難しいという難点があった。そこで我々は、実現の容易な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「偏極光格子時計」を実現した。

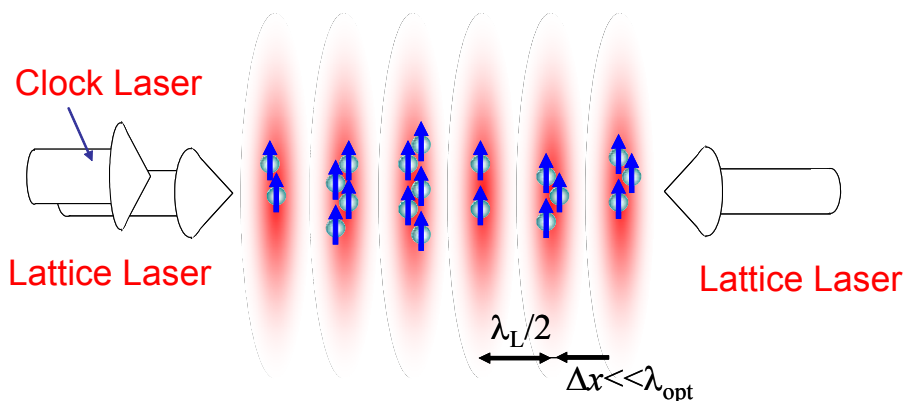


図 1: 偏極光格子時計の概念図。青色の矢印はスピン偏極したフェルミ粒子を表す。

2) 偏極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、GPS 衛星 2 周波搬送波位相方式の構築を進めた。システムの構成を図 2 に示す。比較精度は、平均化時間 1×10^4 秒で 10^{-15} 台、1 日平均で 3×10^{-15} 程度を実現した。この際に用いた解析ソフト GIPSY(米国 JPL が開発)は、オフラインでの解析であり、処理のために GPS 衛星の精密暦や大気遅延推定などの各種データを必要とするため、比較結果を得るために 3 週間程度を要した。このため、現在、基線長が短い(50 km 程度)場合、GPS 衛星から実時間で提供されている放送暦を用い、実時間データ解析が可能な解析ソフトを開発し、ほぼ実時間で東大-産総研間の比較が可能なシステムを構築しつつある。

GIPSY による高精度時間周波数比較システム、水素メーザ周波数標準器及び光コムにより Sr 光格子時計の周波数測定を行い、国際原子時に基づいて Sr「偏極光格子時計」の絶対周波数を 9×10^{-15} の不確かさで決定した。この測定結果が 2006 年 9 月にパリで開催された国際度量衡委員会の時間標準である秒の再定義に関するワーキンググループに報告され、秒の再定義の候補となる「秒の二次表現」に採択された。米国 JILA、仏国 SYRTE のグループが相次いで Sr 光格子時計の測定結果を報告し、日・米・仏の 3 グループが整合性のあるデータを示したことが採択の決定的要因となった。なお、本論文の成果がその時点でもっとも信頼される最新のデータであった。

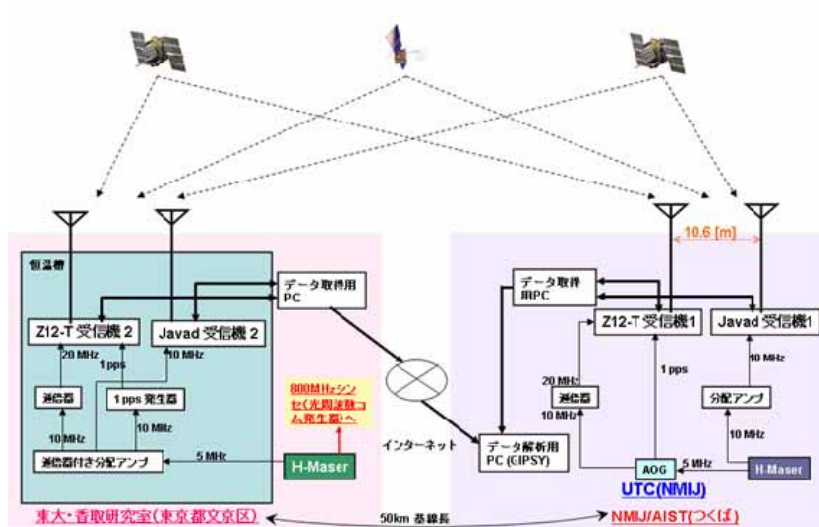


図 2: GPS 搬送波位相方式を用いた東大(本郷)ー産総研(つくば)間高精度周波数比較システム

3) 偏極 1 次元光格子時計、3 次元光格子時計の周波数比較:

「偏極光格子時計」により原子間の相互作用を排除するとともに、ゼーマンシフトの評価手法を確立し、時計の相対的不確かさ 1.2×10^{-15} を実現した。これは、現在の Cs の原子時計による TAI の時系の不確かさにも匹敵し、光格子時計の更なるパフォーマンス評価には、光格子時計同士の周波数比較が必須である。これを実現するため ^{88}Sr による 3 次元光格子時計、 ^{87}Sr による 1 次元偏極光格子時計の同時運転を行い、そのスペクトル比較を開始した。

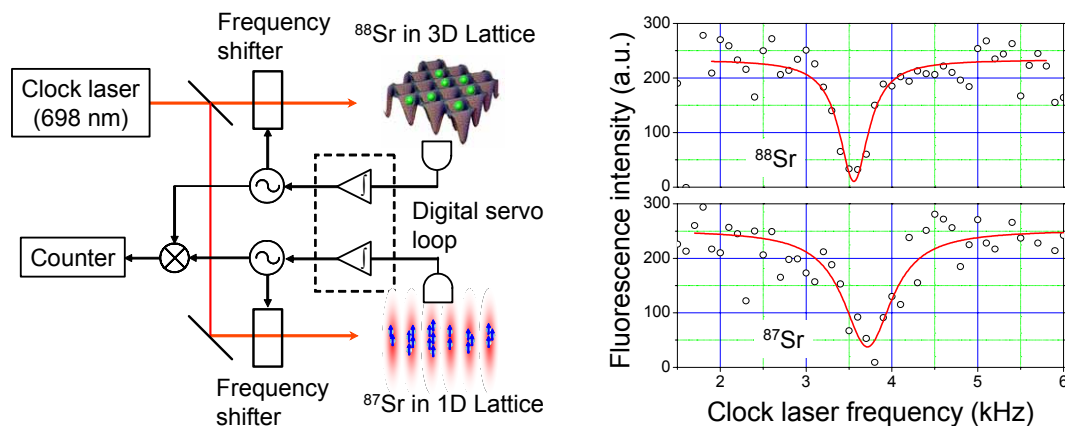


図 3:(左図)Sr の 2 つの同位体を用いた 2 台の光格子時計の周波数比較。(右図)同位体のクロック遷移のスペクトル。およそ 62MHz の同位体シフトのオフセットを加えている。

4) 異種原子による光格子時計の実現:

Yb 原子の 2 段階冷却実験に成功し、Sr/Yb のデュアル光格子実現への目処が立った。一方、Hg 原子の光格子時計実現に必要な UV 域の冷却光源(254nm)の開発を行った。

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 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} ~ 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。

(2)「産総研」グループ

①研究者名

洪 鋒雷(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1Hz 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)ー本郷(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、光ー光、光ー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)ー本郷(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。

4. 研究成果の発表等

(1)論文発表(原著論文)

- Masao Takamoto, Feng-Lei Hong, Ryouchi Higashi, Yasuhisa Fujii, Michito Imae and Hidetoshi Katori, “Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice

Clock with a Spin-Polarized Fermionic ^{87}Sr Isotope”, JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN 75 (10): Art. No. 104302, (Oct 2006)

○H. Katori, M. Takamoto, R. Higashi and F.-L. Hong, “AN OPTICAL LATTICE CLOCK: ULTRASTABLE ATOMIC CLOCK WITH ENGINEERED PERTURBATION”, Proceedings of The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-TOKYO'05) World Scientific, pp276-281.

○Vitaly D. Ovsiannikov, Vitaly G. Pal'chikov, Alexey V. Taichenachev, Valeriy I. Yudin, H. Katori and M. Takamoto, “Magic-wave-induced $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$ transition in even isotopes of alkaline-earth-metal-like atoms”, Physical Review A 75, 020501R, (2007).