

「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。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)パウリの排他律を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、光格子時計の究極の形態であることを示した。この独立した 2 台の光格子時計の周波数比較によって、平均時間 2,000 秒で  $5 \times 10^{-16}$  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。

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。実際に 10 $\mu$ 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 $\mu$ m に対応する光源開発を行った。

## 2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

### 1) 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)間の高精度時間周波数比較手段として、光ファイバー(120km)による周波数リンクを導入した。このファイバーリンクを用いて、光周波数キャリアによる周波数基準信号の伝送[6]及びそれを用いた周波数測定を行った[3]。水素レーザーだけではなく、原子泉方式のセシウム原子時計、ファイバーコム及び光ファイバー長制御装置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 1)。その結果、わずか数時間の測定で  $5.6 \times 10^{-15}$  の不確かさで東大の Sr 光格子時計の絶対周波数を決定することができた。これで、米国 JILA 研及びフランス SYRTE 研の測定値との合致が

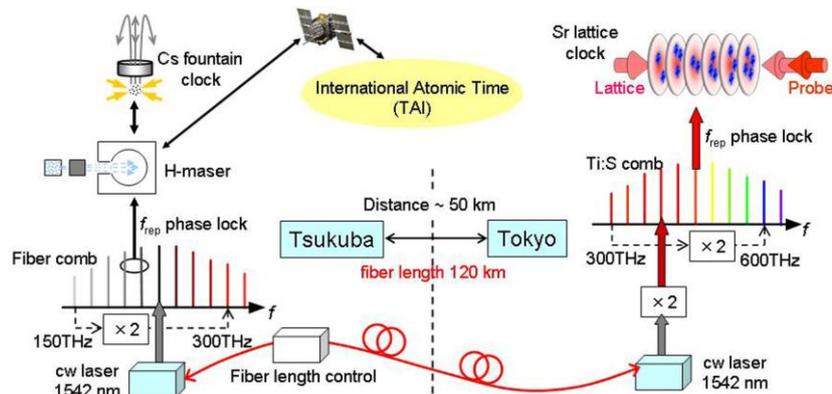


図1: 光周波数キャリア伝送による光ファイバーリンクを用いた東大ー産総研(つくば)間の高精密周波数計測[3]。

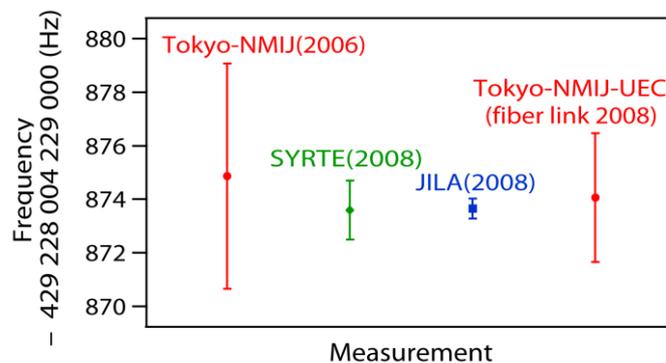


図2: 今回の測定値とフランスの SYRTE 研究所及び米国の JILA 研究所の測定値の比較。  
 $6 \times 10^{-16}$  の合致が得られている[3]。

$6 \times 10^{-16}$  に達した(図2) [3]。

また、つくば-東大間の GPS 搬送波位相による周波数リンクは、データ処理の自動化と高安定水晶発振器制御パラメータの最適化の試行を行い、遠隔サイトの発振器を UTC(NMIJ)に位相同期させる系の自動化に目処を立てた。さらに、東大ー産総研間の周波数比較リンクの強化のため、光ファイバーによるマイクロ波周波数比較技術の開発と適用実験を行った。特に長距離光ファイバー伝送路の損失を補償し、良好な信号対雑音比 (SNR) を実現すべく双方向の光増幅器を開発し、フィールドでの安定動作を確認した。

## 2) 「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。衝突シフトの原因となる原子間相互作用を決定付けるのは粒子のもつ量子統計性である。さらに光格子時計では、「原子の全軌道角運動量が、光格子を作るレーザーの偏光と結合する」ことを考え合わせることで、我々は、究極の光格子時計の実現手法が、(1)偏極フェルミ粒子を用いる 1次元光格子時計、(2)ボーズ粒子を用いる 3次元光格子時計、の 2通りに限られることを議論した[5]。

光格子時計のパフォーマンスは、国際原子時の不確かさを凌駕し、その評価には、光格子時

計の相互比較が唯一の手段となった。我々は、偏極フェルミオン 1 次元光格子時計と、ボソン 3 次元光格子時計を構築し、その周波数比較を行った。10 Hz のフーリエ限界の遷移スペクトルを用いて、時計レーザー周波数を、それぞれの原子  $^{87}\text{Sr}$ 、 $^{88}\text{Sr}$  の遷移周波数に安定化し、周波数差  $f_{88}-f_{87}$  の評価を行なった。2,000 秒の平均時間で、アラン分散は  $5 \times 10^{-16}$  まで低減し、同位体シフトを  $f_{88}-f_{87}=62,188,138.4(1.3)$  Hz と決定した。この 2 台の超高精度原子時計の同時運転により、セシウム原子時計を経由することなく、2 つの光格子時計の周波数比  $f_{88}/f_{87} = 1.000000144883693(3)$  を決定した[5]。

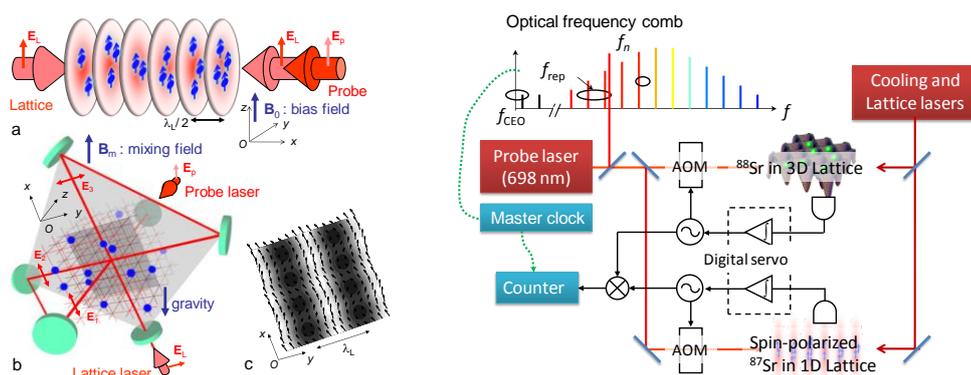


図 3 : (左) 光格子時計の幾何学的形状 (a) スピン偏極 1 次元光格子時計 (b) 3 次元光格子時計。 (c) 3 次元光格子電場のベクトルプロット。 (右) 光格子時計の相互比較による安定度の高精度評価。現在の国際原子時の不確かさを優位に上回る  $(3\text{-}5) \times 10^{-16}$  の安定度 (@1000 秒) を実現した。

### 3) 1 次元光格子中のスピン偏極フェルミ粒子 $^{87}\text{Sr}$ の時計遷移のラビ振動とコヒーレンス[2]

フェルミ粒子を用いる 1 次元光格子時計の衝突シフトの低減のためには、パウリブロッキングを機能させるため、偏極フェルミ粒子の均一な時計遷移の励起が大きな関心事となる。我々は、非偏極フェルミ粒子の除去による、高偏極フェルミ粒子の生成手法を開発し[2]、その原子を空間的に均一なプローブ光で励起することにより、99%以上の時計遷移  $\pi$  パルス励起を達成した。このとき観測されたラビ振動は、重力によるワニエシュタルク状態による格子間トンネリングの抑制、振動準位に依存したラビ周波数、レーザーコヒーレンス、衝突による原子コヒーレンス等を取り入れた、光ブロッホ方程式によるラビ振動のシミュレーション結果と良い一致を示した[2]。

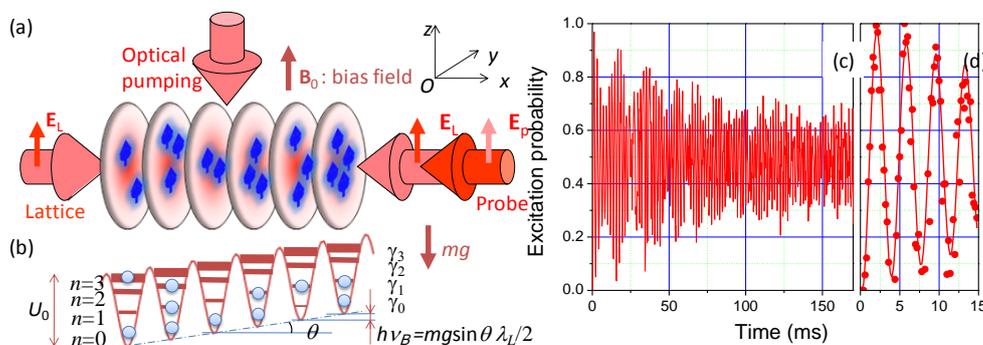


図4: (a) スピン偏極 1 次元光格子時計実験配置。 (b) 光格子ポテンシャル。光格子が重力に対して傾くとき、光格子のブロッホバンド幅は格子間の重力ポテンシャル差によって抑制される。 (c) 時計遷移のラビ振動。原子は光格子の振動準位に熱的に分布し、ラビ周波数は振動準位に依存する結果、ラビ振動にコラプス・リバイバルが現れる。 (d) ラビ振動の拡大図。光格子時計に用いる最初の  $\pi$  パルスでは、99%以上の原子が励起されている。

#### 4) 産総研における Yb 光格子時計の開発

ファイバーコムに安定化した波長 556nm レーザー光源を用いて、スピン禁制遷移磁気光学トラップの安定的な生成に成功し、この光源が 5 日間連続運転可能であることを実証した。また、飛行時間法により、極低温原子の温度測定を行い、FORT 光による  $^{171}\text{Yb}$  原子の捕獲を確認した。さらに、Yb:YAG(1030nm) と Nd:YAG(1319nm) レーザーの和周波により波長 578nm の光を生成し[3]、高フィネス( $\sim 400,000$ )の縦置き光共振器に対して安定化した(図5a)。光共振器の熱膨張係数が 0 になる温度を測定し、光共振器は現在この温度(21.6°C)に温度制御されている。産総研のファイバーコムを用いて測定されたレーザーの安定度は 10 秒で約  $4 \times 10^{-14}$  である(図5b)。この光源を用いて  $^{171}\text{Yb}$  の  $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$  時計遷移(578nm)の励起に成功した。

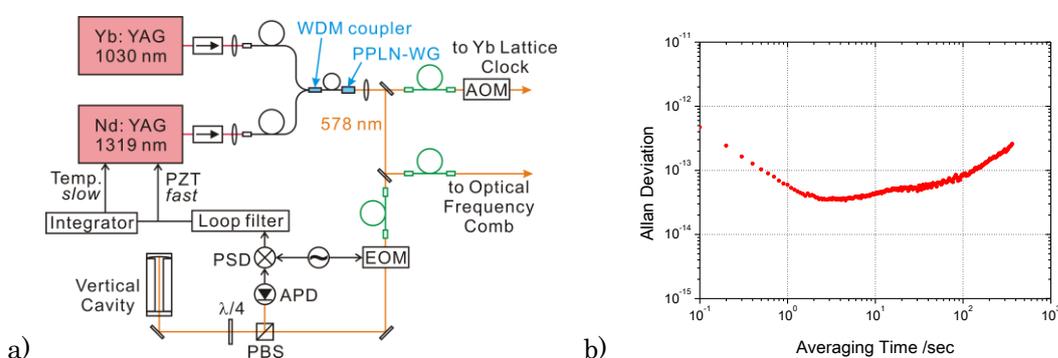


図 5:(a) Yb 光格子時計のためのレーザー光源と安定化方法。(b)光周波数コムによって測定された光源の安定度。

### 3. 研究実施体制

#### (1)「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、准教授）

#### 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。

(2)「産総研」グループ

①研究分担グループ長： 洪 鋒雷（産業技術総合研究所、室長）

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)－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。

#### 4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表（原著論文）

1. M. Takamoto, H. Katori, S. I. Marmo, V. D. Ovsiannikov, and V. G. Pal'chikov, "Prospects for Optical Clocks with a Blue-Detuned Lattice," *Phys. Rev. Lett.* **102**, 063002 (2009)
2. Masao TAKAMOTO and Hidetoshi KATORI, "Coherence of Spin-Polarized Fermions Interacting with a Clock Laser in a Stark-Shift-Free Optical Lattice" *Journal of the Physical Society of Japan* Vol. 78, 013301 (2009)
3. F.-L. Hong, M. Musha, M. Takamoto, H. Inaba, S. Yanagimachi, A. Takamizawa, K. Watabe, T. Ikegami, M. Imae, Y. Fujii, M. Amemiya, K. Nakagawa, K. Ueda, and H. Katori, "Measuring the frequency of a Sr optical lattice clock using a 120 km coherent optical transfer," *Opt. Lett.* **34**, 692 (2009).
4. Feng-Lei Hong, Hajime Inaba, Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda, and Atsushi Onae, "Doppler-free spectroscopy of molecular iodine using a frequency-stable light source at 578 nm," *Opt. Express* **17**, 1652 (2009).
5. Tomoya Akatsuka, Masao Takamoto, and Hidetoshi Katori, "Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions," *Nat. Phys.* **4** (12), 954-959 (2008).
6. Mitsuru Musha, Feng-Lei Hong, Ken'ichi Nakagawa, and Ken-ichi Ueda, "Coherent optical frequency transfer over 50-km physical distance using a 120-km-long installed telecom fiber network", *Opt. Express*, Vol. 16, No. 21, 16459 (2008).
7. S. Blatt, A. D. Ludlow, G. K. Campbell, J. W. Thomsen, T. Zelevinsky, M. M. Boyd, J. Ye, X. Baillard, M. Fouche, R. L. Targat, A. Brusch, P. Lemonde, M.

Takamoto, F. L. Hong, H. Katori and V. V. Flambaum, “New Limits on Coupling of Fundamental Constants to Gravity Using  $^{87}\text{Sr}$  Optical Lattice Clocks” Phys. Rev. Lett. 100, 140801 (2008).

8. Takuya Kohno, Masami Yasuda, Hajime Inaba, and Feng-Lei Hong, “Optical Frequency Stability Measurement of an External Cavity Blue Diode Laser with an Optical Frequency Comb”, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 8856 (2008).

(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)