「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 平成 21 年度 実績報告

## 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。 2008 年度までに 2 台の Sr 光格子時計の周波数比較を世界で初めて実現し、(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 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。2009 年度は、さらに時計レーザーの改良をすることで、2.7Hz の光遷移 スペクトルを観測した。この結果、比較の安定度は、レーザー安定化に用いる参照共振器ミラーの 熱雑音限界に達した。これを改善すべく、2 台の光格子時計の同期した時計遷移励起を行うことで、 時計レーザーノイズに制限を受けない光格子時計の安定度評価法を提案し、その開発に着手した。 この他、1×10<sup>-18</sup>を上回る不確かさの光格子時計実現を目指し、原子と光格子レーザー場の多重 極相互作用まで取り入れた、光格子時計の魔法波長の精密な定義を議論した。一方、Yb 原子を 用いた光格子時計を実現し、異種原子光格子時計比較への端緒を築いた。

# §2. 研究実施体制

(1)「東大」グループ(研究機関別)

①研究分担グループ長:香取 秀俊(東京大学、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<sup>-16</sup>~10<sup>-17</sup>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(研究機関別)
  - ①研究分担グループ長:江鋒雷(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)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-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<sup>-15</sup>@3h)周波数比較法を構築する。

# §3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

1) レーザー安定化共振器の熱揺らぎ限界での Sr 光格子時計の実現と安定度評価

光格子時計の安定度は、時計遷移励起レーザーの安定度によって制限され、このレーザー安定 度は、安定化を行う参照光共振器に加わる振動ノイズにより劣化する。 我々は、振動ノイズ感度の 低い光共振器を設計し、実測値として5kHz/(m/s<sup>2</sup>)の低振動感度を実現した。 この結果、レーザー の安定度は参照光共振器の母材 (ULE、超低熱膨張ガラス)の熱揺らぎに制限される熱的ノイズ 限界に達した。 この高安定化レーザーを用いて、光遷移スペクトルを 2.7Hz(@429THz)の狭線幅 で観測し、2台の光格子時計の相互比較では、1000秒の平均時間で 2×10<sup>-16</sup>の安定度 [ $\sigma_y(\tau) = 6$ ×10<sup>-15</sup>  $\tau$ <sup>-1/2</sup>] を得た。



図 1:低振動感度・光共振器に周波数制御された高安定な時計レーザーを用いた周波数比較。青;一次元光格子の安定度評価。赤;一次元–三次元光格子時計間の周波数比較による 安定度評価。内挿図;線幅 2.7Hz の超精密時計遷移分光スペクトル。

#### 2) レーザーノイズを同相除去する新たな光格子時計評価の提案と実現

安定化を行う共振器ミラーに由来する熱的レーザーノイズ限界を超える時計比較の安定度-光格 子中の原子集団(原子数106個、線幅10Hz)の量子射影ノイズ限界 σ<sub>y</sub>(τ) = 2×10<sup>-17</sup> τ<sup>-1/2</sup>の安定 度-を実現するため、2 台の光格子時計の同期運転による同相レーザーノイズ除去の手法を開発 した。これまで2 台の光格子時計比較では、光格子時計を交互に運転して周波数比較を行ってい た。これに対し、2 台の光格子時計を時間的に同期させて運転し、同一の周波数ノイズ相関をもっ た時計レーザーで2 台の時計の原子遷移を励起することで、レーザーノイズを同相ノイズとして除 去することが可能になる。これによって、光格子時計の量子射影ノイズのみで制限されるような低雑 音(高安定)な周波数比較が実現できることを提案し、シミュレーションでその有効性を確認した。こ の手法を用いた周波数比較実験にも着手した(図 2)。この高安定な周波数比較の手法は、高安 定な光ファイバーリンク・光コムを用いた、遠隔地、異原子種間の周波数比較においても有効であ り、ジオイド差測定、基礎物理定数の恒常性の検証等、への応用が期待される。

### 3) 多重極相互作用を入れた魔法波長の定義

「魔法波長・光格子」で相殺することができない4次以上の高次の光シフトに対しては、原子を光の 定在波の節に捕獲する高周波離調の光格子が有効であり、これに対応する魔法波長の決定を



図 2: 光格子時計の同期周波数比較(シミュレーションと実験結果)。現在の実験条件で、理論的にはおよそ一桁半の安定度の向上が期待される。予備実験では約3倍の安定度向上が確認された。

行った[文献 2]。光格子電場と原子の電気双極子相互作用を考える限りにおいては、この手法は 非常に有効に思われるが、光と原子の多重極相互作用まで検討するとき、必ずしも理想的ではな いことを発見した。我々は、磁気双極子、電気四重極子まで入れた光シフトを理論的に検討するこ とで、特定の光格子の幾何学的配置に対しては、「原子運動に依存する周波数シフトが生じない」 光格子時計を構築可能であることを示した[文献 1]。この考察は、低周波離調を含むすべての光 格子時計での厳密な「魔法波長」の定義を与え、10<sup>-18</sup>のレベルの光格子時計の実験で重要な役 割を演じる。

4) 産総研における Yb 光格子時計の開発

4-1) Yb 光格子時計の開発

極低温 171Yb 原子を光格子に捕獲し、狭線幅レーザーを用いて、その時計遷移を分光することに 成功した(図 4)。また、魔法波長を実験的に求め、759.353(3) nm と決定した。その上、光周波 数コムを用いて時計遷移の絶対周波数計測に成功した[文献 4]。時計遷移の中心絶対周波数は、 4本のスペクトル(図 4 b)のピーク周波数をそれぞれフィッティングにより求め、それらの平均値とし た。図 5 は、時計遷移  $1S_0$ (F = 1/2)  $3P_0$ (F = 1/2)の 12 回の絶対周波数計測結果である。さらに



図3:原子運動に依存しない光格子時計の構築。上図に示した偏光のレーザー電磁場により光格子を形成するとき、電気双極子(E1)、磁気双極子(M1)、電気四重極子(E2)相互作用による 光シフトのうち、2 つは同相となり、残りは 90°位相がずれ、空間的に均一な光シフトとして補正可能になる。



図 4: a). 観察された時計遷移スペクトル 図 4: b). キャリア成分の拡大図



図 5: Yb 光格子時計の絶対周波数測定

各種の不確かさ要因を分析した結果、171Yb原子の時計遷移の絶対周波数は、518 295 836 590 864(28) Hzと決定した(相対不確かさ: 5.4×10<sup>-14</sup>)。この測定値が、今年6月に国際度量衡局で行われた時間・周波数諮問委員会において周波数標準のリストに新規追加された。これにより、Yb原子光格子時計も秒の二次表現として採択される道が開かれた。

#### 4-2) Yb 光格子時計のための時計遷移励起用レーザーの開発

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、 高フィネスの縦置き光共振器に対して安定化した。光周波数コムを用いてこの光源を評価し、周波 数安定度は 10 秒で約 2×10<sup>-14</sup>であることが分かった[文献 5]。これは位相変調をかけた際の残留 AM によって制限されていると考えられる。このレーザーを用いて、Yb 原子の時計遷移分光に成 功した。また、別の Nd:YAG レーザーを用いて、波長 1064nm の光を高フィネスの縦置き光共振 器に対して安定化した。上述の狭線幅化されたファイバコムをこの 1064nm のレーザーに対して安 定化することで、広帯域にわたるローカルオシレーターの開発に成功した。これを用いて、波長 578nm の光源の評価を開始した。

4-3) Sr 光格子時計の開発

Yb 光格子時計の評価のために、Sr 光格子時計の開発に着手した。これにより、マイクロ波を介さない、光・光比較が可能となり、迅速な評価が可能となる。さらに、微細構造定数の恒常性の実験的検証も可能となると考えられる。具体的には、新たな光学テーブルを購入し、真空装置を組み立てた。また、1次冷却に必要な光(461 nm)のための光源(922 nm)を開発した。

### 4-4) 光周波数コムの Yb 光格子時計への適用

長期稼働性に優れるファイバレーザーを用いた光周波数コム「ファイバコム」を Yb 光格子時計の時計遷移観察用レーザー(578 nm)に適用し、その絶対周波数測定を行った。また、ファイバコムを時計遷移レーザーの線幅評価などに用いるため、ファイバコムの狭線幅化を行った。その結果、1 Hz 以下の相対線幅を得た。

## §4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表 論文詳細情報

- H. Katori, K. Hashiguchi, E. Yu. Il'inova, V. D. Ovsiannikov, "Magic Wavelength to Make Optical Lattice Clocks Insensitive to Atomic Motion," Phys. Rev. Lett. 103, 153004 (2009) (\*) DOI:10.1103/PhysRevLett.103.153004
- 2. M.Takamoto, H. Katori, S. I. Marmo, V. D. Ovsiannikov, and V. G. Pal'chikov,

- Takuya Kohno, Masami Yasuda, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima and Feng-Lei Hong, "One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Fermionic <sup>171</sup>Yb Isotope", Appl. Phys. Express 2, 072501 (2009). DOI: 10.1143/APEX.2.072501
- 4. Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Yoshiaki Nakajima, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, "Evaluation of the clock laser for an Yb lattice clock using an optical fibre comb", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 57, 606-612 (2010). DOI:10.1109/TUFFC.2010.1454
- Y. Nakajima, H. Inaba, K. Hosaka, Kaoru Minoshima, A. Onae, M. Yasuda, T. Kohno, S. Kawato, T. Kobayashi, T. Katsuyama, and F.-L. Hong, "A multi-branch, fiber-based frequency comb with millihertz-level relative linewidths using an intra-cavity electro-optic modulator," Opt. Express 18, 1667-1676 (2010). DOI:10.1364/OE.18.001667
- Tomoya Akatsuka, Masao Takamoto, and Hidetoshi Katori, "Three-dimensional optical lattice clock with bosonic Sr88 atoms," Phys. Rev. A 81, 023402 (2010). DOI:10.1103/PhysRevA.81.023402