

博士論文（要約）

# 水銀光格子時計の開発

山中 一宏

## 1. 研究目的

現在の秒の定義として用いられるセシウム原子時計は、 $10^{-15}$  を下回る不確かさに到達しており [1], 様々な物理量の標準器の中でも最高精度を達成している. このため, 秒は時間標準としての役割にとどまらず, 様々な計測の基盤として重要な役割を占めている. 時間標準の精度をさらに向上させるため, 従来用いられてきたマイクロ波遷移より高周波の光周波数遷移を参照とした, より不確かさの小さい原子時計の開発を目指した研究が活発に進められている. なかでも, レーザー電場による光格子中にトラップした中性原子の電子遷移を参照とする光格子時計は, 確度・安定度の両面で優れている理想的な系であると考えられている [2]. すでにストロンチウムやイッテルビウムを用いた光格子時計では既存のセシウム原子時計以下の不確かさが実現され, 次世代時間標準の有力候補である秒の二次表現に採択されている [3].

ストロンチウムやイッテルビウム光格子時計の不確かさを制限する最も大きな要因の一つが環境からの黒体輻射光による周波数シフトである. そこで, 本研究では光格子時計に用いることが可能な原子種の中で最も黒体輻射光による時計遷移周波数シフトが小さい [4], 水銀原子を用いた光格子時計の開発を行った. 水銀の  $^1S_0$ - $^3P_0$  時計遷移の黒体輻射光による光シフトはストロンチウムやイッテルビウムと比べて一桁以上小さいため, 水銀を用いることにより光格子時計のさらなる高精度化や室温でのより簡素な実験系での時計動作の実現が期待できる.

光格子時計をはじめとする高精度原子時計の応用例として, 微細構造定数  $\alpha$  の恒常性の検証が挙げられる.  $\alpha$  の変動がある場合の遷移周波数の変動は原子の核電荷  $Z$  によって  $\sim (\alpha Z)^2$  でスケールされるため,  $Z = 80$  と核電荷が大きい水銀による光格子時計と, 核電荷が小さいストロンチウムなどの他の原子種による時計との周波数比の計測により  $\alpha$  の恒常性について今までにない精度での検証が期待できる [5].

そこで本研究では,  $^{199}\text{Hg}$  同位体を用いた光格子時計を開発し, その性能評価を行った. なお, 本研究は理化学研究所香取量子計測研究室にて行ったものである.

## 2. 本研究における成果

### 2-1. 水銀光格子時計の開発

水銀光格子時計の動作のためには、原子のレーザー冷却 ( $\lambda = 254 \text{ nm}$ )、時計遷移のプローブ ( $\lambda = 266 \text{ nm}$ ) や、魔法波長の光格子 ( $\lambda = 363 \text{ nm}$ ) といった用途に紫外領域のレーザーが必要であり、技術的にチャレンジングであった。本研究では、上記の紫外レーザーや真空装置などの実験装置開発を行い (図1)、磁気光学トラップによるレーザー冷却、魔法波長光格子トラップ、魔法波長光格子中での時計遷移の分光を実現し、線幅として  $7.4(4) \text{ Hz}$  ( $Q \sim 1.5 \times 10^{14}$ ) の時計遷移スペクトルの観測に成功した (図1挿入図)。

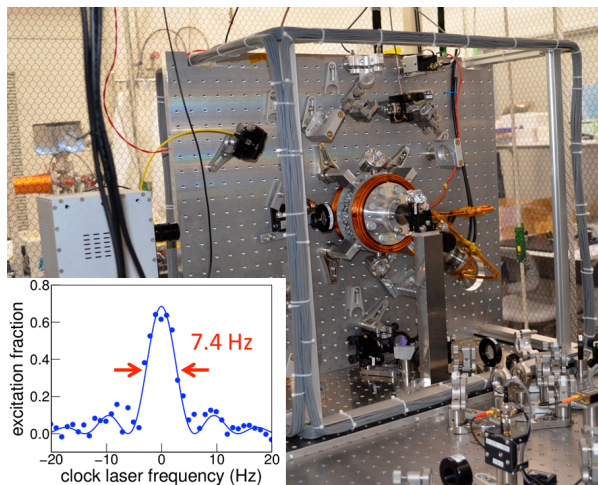


図 1: 開発した水銀光格子時計実験装置. 挿入図は時計遷移のスペクトルである.

さらに、時計遷移への時計レーザーの周波数安定化を行い、水銀光格子時計の動作を実現した。

### 2-2. 水銀光格子時計の性能評価

#### A. 水銀光格子時計の系統不確かさの評価

開発した水銀光格子時計の周波数をシフトさせる種々の要因に対し、補正值とその不確かさを評価した (表1)。中でも、先行研究[6]で不確かさに最も大きく寄与していた光格子による光シフトについて、本研究では、時計遷移へのレーザー周波数安定化や、光格子レーザー周波数の光周波数コムを用いた安定化を行うことにより、より精密に光シフトの測定を行った。ただし、光シフトの測定精度の向上に伴い、従来無視できた光シフトの強度に関する非線形項を考慮した解析が必要になった。特に、非線形項により引き起こされる

atomic-motion dependent shift [7]も考慮して測定結果を解析した結果、光シフトの不確かさとして  $6.5 \times 10^{-17}$  を達成した。

本研究で開発した水銀光格子時計の系統不確かさの合計は  $8.6 \times 10^{-17}$  であり、先行研究と比較して2ケタ近く不確かさが改善した。本結果は水銀光格子時計の周波数シフトについて、SI秒の実現不確かさより小さい不確かさでの初めての評価であり、水銀光格子時計が次世代時間標準として有望なシステムであることを実証したものである。

表 1:  $^{199}\text{Hg}$  時計遷移周波数に対する補正值と不確かさ。

要因	補正值	不確かさ
光格子光シフト	2.6	6.5
2次ゼーマンシフト	6.1	0.9
原子数密度シフト	1.6	1.6
黒体輻射シフト	16.1	3.3
時計光シフト	0	< 0.1
AOMチャープ	0	< 1
サーボエラー	-0.4	0.3
合計	<b>25.8</b>	<b>7.5</b>

## B. ストロンチウム光格子時計との周波数比測定

現在の秒の定義を与えるセシウム原子時計を参照とした絶対周波数計測では、その不確かさは使用するセシウム原子時計の不確かさで制限される。本研究で開発した水銀光格子時計は SI 秒の実現不確かさよりも小さい不確かさで評価できたため、水銀光格子時計の時計遷移周波数 $\nu_{\text{Hg}}$ と、 $7.2 \times 10^{-18}$ の系統不確かさを実現しているストロンチウム光格子時計[8]の時計遷移周波数 $\nu_{\text{Sr}}$ との周波数比 $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$ の直接測定を行った。 $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$ をおよそ三ヶ月の期間において複数回測定し、その再現性の評価を行った結果を図2（左）に示す。本研究で得られた周波数比 $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$ は  $8.6 \times 10^{-17}$ の不確かさの範囲内で再現し、その加重平均は $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}} = 2.629\,314\,209\,898\,909\,57(23)$ であった。周波数比測定の不確かさには水銀光格子時計の系統不確かさが最も大きく寄与している。

水銀、ストロンチウム光格子時計の周波数比の直接測定は本研究が初めてであるが、SI 秒を基準とした水銀、ストロンチウム時計遷移周波数のそれぞれの先行研究の結果から周波数比を算出し、本研究で得られた結果とを比較することによって、独立に開発された水銀、ストロンチウム光格子時計の周波数比再現性を検証することが可能である。LNE-SYRTE による水銀光格子時計とストロンチウム光格子時計の絶対周波数測定[6, 9]から求められる周波数比は $(\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}})_{\text{SYRTE}} = 2.629\,314\,209\,898\,927(15)$ と算出でき、不確かさは水銀光格子時計の不確かさにより制限されている。図2（右）に示すように、本測定で得られた $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$ は、ほぼ $(\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}})_{\text{SYRTE}}$ の  $1\sigma$ 不確かさの範囲内に収まっている。また、本測定結果と CIPM によるストロンチウム時計遷移周波数の勧告値を用いると、 $^{199}\text{Hg}$  時計遷移周波数は $\nu_{\text{Hg}} = 1\,128\,575\,290\,808\,155.4(1.1)\text{ Hz}$ と算出できる。

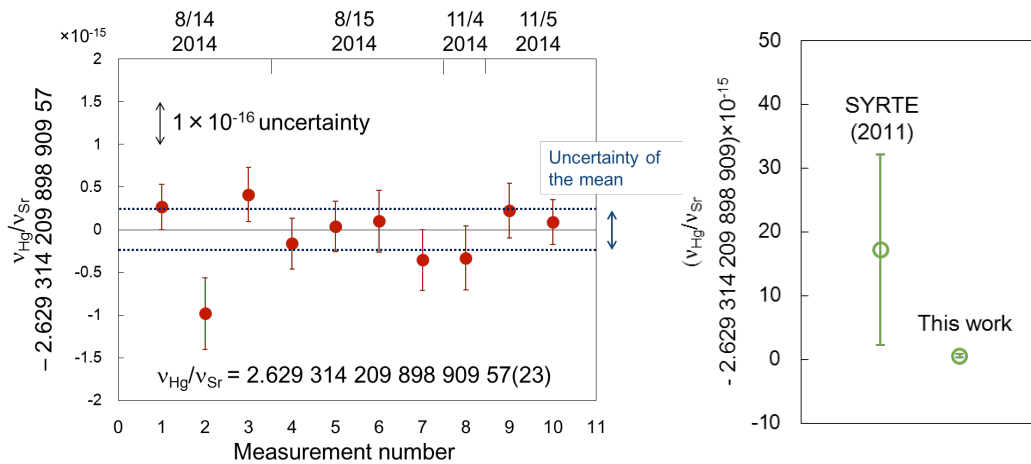


図 2: (左) 本研究における $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$ 測定結果の履歴。(右) 本研究と先行研究との $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$ の比較。

### 3. 研究成果の意義と今後の展望

本研究では水銀光格子時計を開発し、現在の SI 秒の実現不確かさよりも小さい  $7.5 \times 10^{-17}$  の系統不確かさを実現した。さらに、秒の二次表現に採択されているストロンチウム光格子時計との周波数比の測定を行った。測定された周波数比  $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$  は 2 つの時計の系統不確かさの範囲内で再現し、その周波数比を  $8.6 \times 10^{-17}$  の不確かさで決定した。これらの結果は、次世代時間標準の候補リストである秒の二次表現への  $^{199}\text{Hg}$  時計遷移の採択を強く後押しするものであると考えている。

$\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$  測定の  $8.6 \times 10^{-16}$  の不確かさは、異原子種を用いた光格子時計間の周波数比としては SI 秒の実現不確かさより小さい不確かさでの初めての結果である。現在、世界各地の研究機関で SI 秒の実現不確かさよりも小さい光格子時計が実現されており、そのような高精度光格子時計の評価として、SI 秒を参照とした絶対周波数測定に加えて、SI 秒の実現不確かさに制限されない、異原子種光格子時計の直接周波数比が光格子時計による秒の再定義に向けて最も重要な測定量の一つとなると考えられる。本研究の結果はそのような SI 秒の実現精度を上回る周波数比測定の端緒となる実験であり、秒の定義の変更の必要を迫るものである。

現在の原子時計の周波数比測定による微細構造定数の恒常性への最も厳しい制限は  $\dot{\alpha}/\alpha = (-2 \pm 2) \times 10^{-17} \text{ /year}$  [10] である。今後、より詳細な水銀光格子時計の評価が進展し、 $1 \times 10^{-17}$  以下の不確かさで  $\nu_{\text{Hg}}/\nu_{\text{Sr}}$  を数年にわたって測定すると、 $\alpha$  の恒常性について今までにない精度での検証が可能になる。このような、基礎物理定数の恒常性の検証は、素粒子物理学の標準模型を超える理論的枠組みへの重要な知見を与えることが期待される。

### References

- [1] T. E. Parker, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 021102 (2012).
- [2] H. Katori, M. Takamoto, V. Pal'chikov, and V. Ovsiannikov, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 173005 (2003).
- [3] Comité Consultatif du Temps et des Fréquences, 19th meeting (2012).
- [4] H. Hachisu et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 053001 (2008).
- [5] E. Angstmann, V. Dzuba, and V. Flambaum, *Phys. Rev. A* **70**, 014102 (2004).
- [6] J. J. McFerran et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 183004 (2012).
- [7] A. Taichenachev, V. Yudin, V. Ovsiannikov, V. Pal'chikov, and C. Oates, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 193601 (2008).
- [8] I. Ushijima, M. Takamoto, M. Das, T. Ohkubo, and H. Katori, *Nat. Photonics* (in press)
- [9] R. Le Targat et al., *Nat. Commun.* **4**, 2109 (2013).
- [10] N. Huntemann, B. Lipphardt, Chr. Tamm, V. Gerginov, S. Weyers, and E. Peik, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 210802 (2014).