

光格子時計の高精度化に関する研究 (031303015)

Development of high performance optical lattice clock

研究代表者

香取秀俊 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
Hidetoshi Katori, Department of Applied Physics, School of engineering, The University of Tokyo

研究分担者

高本将男 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
Masao Takamoto, Department of Applied Physics, School of engineering, The University of Tokyo

研究期間 平成 15 年度～平成 19 年度

本研究開発の概要

時計遷移のシュタルクシフトをキャンセルする光格子の手法を用いた新たな光標準の手法—光格子時計—を提案し、現在の時間標準であるセシウム原子時計や次世代標準として期待されている単一イオンを用いる光標準に比べ、本手法が優位性をもつ時間標準となりうることを実験的に明らかにした。ストロンチウム原子の時計遷移を 10 Hz の線幅で測定し、それら 2 台の光格子時計の相互比較によって、積分時間 2,000 秒でアラン分散 5×10^{-16} の安定度を得た。この結果、国際原子時を上回る精度での光格子時計の評価を実現した。我々の測定した ^{87}Sr の時計遷移周波数は、2006 年の「秒の二次表現」の採択に大きく貢献し、本手法を用いる「秒の再定義」に向けた大きな端緒を開いた。

Abstract

We have proposed and developed “optical lattice clock” that would realize next generation atomic clock. Geometrical configuration of the clock was considered from a viewpoint of the quantum statistical properties of interrogated atoms. This led to two clock configurations, i.e., spin-polarized fermions in a 1D lattice and bosons in a 3D one. Frequency comparison of these clocks demonstrated the stability of 5×10^{-16} at 2,000 s, better than that of the state-of-the-art Cs fountain clocks. Determination of the clock transition frequency of ^{87}Sr has contributed to adding its frequency in the list of “the secondary representation of the second.” We thus established an important step toward the future redefinition of the second by the proposed clock scheme.

1. まえがき

原子スペクトルの極限計測技術の追求は、時代とともにそのコンテキストを変えながら尽きることない話題を提供し続ける実験物理学のハイライトであり、基礎物理学の根幹を成す。この一方で、原子スペクトルの精密計測によって実現される高精度な原子時計は、全地球測位システム (GPS) 精度の向上や超高速大容量通信ネットワークなど、現代社会を支える先端技術において不可欠な技術となった。

現行のマイクロ波遷移を用いるセシウム原子時計に比べて、数桁の精度向上が可能とされる原子の光遷移を用いる原子時計「光時計」の研究は、次世代の原子時計として全世界の研究機関で急ピッチで進められている。光時計実現の具体的手法は、1989 年のノーベル物理学賞の 3 人の研究「W. Paul, H. Dehmelt らのイオントラップ中での単一イオンの観測」と「自由空間中のアルカリ土類原子の Ramsey 分光」に代表される。この高精度化に向けた実験的努力がこの 20 年以上にわたって続けられた結果、その精度はそれらの手法が持つ原理的な測定限界に迫ろうとしている。

本研究では、無摂動原子を対象としてきた従来の原子時計研究の大前提に挑む、新しい原子時計手法を提案し、その実現を目指した。巧妙に設計した摂動を原子に積極的に印加して原子運動を制御することで、極限的な安定度と正確さを併せ持つ原子時計が構成できることを「光格子時計」のアイデアによって実証する。

2. 研究内容及び成果

2.1 光格子時計の設計—量子統計性と光格子の幾何学からの検討—

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。このため捕獲した単一粒子を観測する「単一イオン時計」が、この数十年にわたり、次世代原子時計として最有力視されてきた。ところが、この手法では観測される信号が弱く、時計の安定度向上のためには、相互作用を排除しつつ多数粒子を同時に観測する方法が模索されていた。

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。同種フェルミ粒子なら、パウリの排他律に従い原子が同一の場所に見出されることはなく衝突は回避される。一方、同種ボース粒子の場合には、原子は同一の状態をとろうとする性質があるため、衝突は不可避である。さらに「原子の全軌道角運動量が、光格子を作るレーザーの偏光 ϵ_L 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) ボース粒子を用いる 3 次元光格子時計

の 2 通りに限られることを議論した。

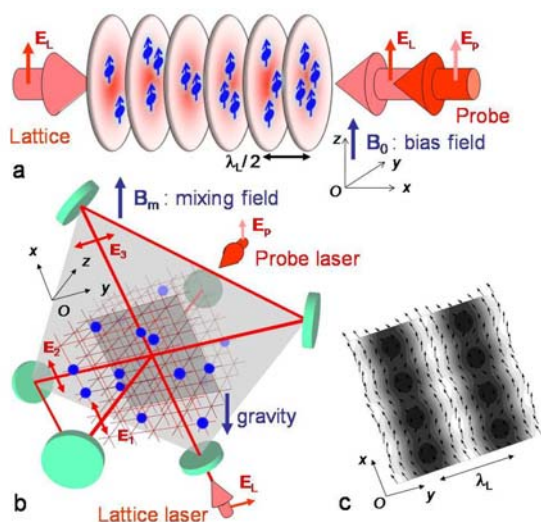


図 1: 光格子時計の幾何学的形状 (a) スピン偏極 1 次元光格子時計では、フェルミ粒子をスピン偏極し、パウリの排除律による衝突抑制を行う。(b) 3 次元光格子時計では各サイトの占有数が 1 以下の格子を実現しボース粒子のパンチングを排除する。(c) 3 次元光格子電場のベクトルプロット。

2. 2 偏極光格子時計の絶対周波数計測、「秒の二次表現」採択へ

偏極光格子時計によって達成される時計安定度は、現在の最高レベルの Cs 原子時計の安定度にも匹敵するレベルに達した。2006 年には、産総研グループとの共同研究によって GPS の搬送波位相を用いた世界協定時 UTC(NMIJ) との高精度リンクを実現した。この絶対周波数測定によって、 ^{87}Sr の時計遷移 $^1\text{S}_0(F=9/2) \rightarrow ^3\text{P}_0(F=9/2)$ の遷移周波数を、

$$\nu = 429,228,004,229,875(4.2)\text{Hz}$$

と決定し、2006 年 8 月に J. Phys. Soc. Jpn. 誌に投稿した。これは投稿時点で最も高い精度をもつ結果であった。この論文は同月アクセプトされ、その成果は、2006 年 9 月にパリの国際度量衡局で開かれた国際度量衡委員会時間周波数諮問委員会に報告された。この結果、Sr 光格子時計が「秒の二次表現」の 1 つとして採択され、同年 10 月の国際度量衡委員会で最終的に承認された。この採択では、日・米・仏グループの測定結果の加重平均として、

$$\nu = 429,228,004,229,877\text{Hz}$$

が採用された。

2. 3 3 次元光格子時計・偏極光格子時計の周波数比較： 10^{-16} の安定度評価へ

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}Sr 、 ^{88}Sr の遷移周波数に安定化し、周波数差 $f_{88} - f_{87}$ の評価を行った。2,000 秒の平均時間で、アラン分散は 5×10^{-16} ままで低減し、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、セシウム原子時計のリファレンスを経由すること

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。

3. むすび

光格子時計の構成を被観測原子の量子統計性と、光格子の幾何学的形状の観点から議論し、その最適設計—偏極フェルミオンによる 1D 光格子時計・ボソンによる 3D 光格子時計—を行い、これらの時計安定度を実験的に評価した。この比較の不確かさは、セシウム原子時計の不確かさ 1×10^{-15} を凌駕し、まさに当初の目標であった、セシウム原子時計リミットを超える測定を実現した。この相互比較は、今後の光格子時計の研究において唯一の評価法であり、この比較によって得られる周波数比が重要な物理を含むことになる。仮にストロンチウム原子・光格子時計で秒の再定義が行われれば、すべての周波数計測は f_x / f_{87} の周波数比測定に帰着する。本研究最終年度に行った f_{88} / f_{87} の計測がこの歴史的な最初の一例になることを期待したい。

【誌上発表リスト】

- [1] M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, Y. Fujii, M. Imae and H. Katori, “Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic ^{87}Sr Isotope”, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 104302 (2006)., 被引用度数：6
- [2] M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, “An optical lattice clock”, Nature **435**, 321-324 (2005)., 被引用度数：79
- [3] H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal'chikov, and V. D. Ovsiannikov, “Ultrastable Optical Clock with Neutral Atoms in an Engineered Light Shift Trap”, Phys. Rev. Lett. **91**, 173005 (2003)., 被引用度数：69

【受賞リスト】

- [1] 香取秀俊、第 20 回 日本 IBM 科学賞、“超高精度原子時計を実現する「光格子時計」の開発”、2006 年 10 月 26 日
- [2] 香取秀俊、独立行政法人日本学術振興会 第 1 回 日本学術振興会賞、“光格子を用いた超高精度・原子時計の開発”、2005 年 3 月 22 日
- [3] 香取秀俊、French Society of Chronometry and Piezo Electricity, European Time and Frequency Award、“周波数標準分野における革新的技術開発”、2005 年 3 月 21 日

【報道発表リスト】

- [1] “ひらめきの瞬間 21 世紀の担い手たち Vol.99 時を刻む”、日経サイエンス、2007 年 3 月
- [2] “世界中の「1 秒」を決める!? 東大の光格子時計 標準器候補に浮上”、読売新聞、2006 年 10 月 9 日
- [3] “宇宙誕生から今まで 1 秒も狂わない 光格子時計”、朝日新聞ほか、2005 年 5 月 24 日