

「光の利用と物質材料・生命機能」研究領域 領域活動・評価報告書

—平成21年度採択研究課題—

研究総括 増原 宏

1. 研究領域の概要

本研究領域は光との相関を新しい光源から探ることにより、情報通信、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス、環境・エネルギー等の諸分野において、これまでにない革新技术の芽の創出を目指す研究を対象とする。具体的には、光源として高出力、超短パルス、超長波長のレーザー、放射光、極微弱光、単一光子レベルの光も想定し、光の本質に迫る研究、光を使い尽くす研究、光でのみ可能になる合成・物性・機能の研究、光によって実現するプロセス、光に関わる細胞機能、光で初めて解き明かされる生体組織、光でのみ制御できる生命機能、これに加えてリアルな材料や生物を対象とした光計測法、イメージング法の研究などが含まれる。

2. 中間評価対象の研究課題・研究者名

件数:1件(うち、大挑戦型1件)

※研究課題名、研究者名は別紙一覧表参照

3. 研究実施期間

平成21年10月～平成25年3月(※平成27年3月終了予定)

4. 中間評価の手続き

研究者の研究報告書を基に、評価会(領域会議等)での発表・質疑応答、領域アドバイザーの意見などを参考に、下記の流れで研究総括が評価を行った。

(中間評価の流れ)

平成24年9月 評価会開催(領域会議、アドバイザー会議、終了検討会)

平成25年3月 研究総括による中間評価

平成25年3月 被評価者への結果通知、研究計画見直し

5. 中間評価項目

(1) 研究の進捗状況と今後の見込み

(2) 研究成果の現状と今後の見込み

(3) さらに、大挑戦型として取り組む挑戦的な研究項目に対する進展についても評価項目とした。

6. 研究結果(中間評価)

志賀研究者は、二期生15名の内ただ1名の5年型で、しかも大挑戦である。研究内容は光原子時計の精度を向上させるためのレーザーの安定度を高めることであり、原子時計は、標準時や電波天文台や人工衛星に用いられており、現在も精力的にその精度を向上する研究が行われている。志賀研究者は、この分野に革新をもたらす可能性がある研究課題を提案し、当さがけ領域に5年型大挑戦として採用された。その責務をはたすべく、さまざまな技術課題を1つずつ解決しながら研究を進め、着想を得たアイデアを理論的に検討した結果を論文として発表し、また量子位相情報を壊すことなく計測する「弱い計測」がファラデー効果を計測することで可能であることをシミュレーションで示し、これも論文として発表した。また、基本的な「原子位相ロック」法については特許を出願した。

1. 志賀 信泰 研究者「原子位相ロックを用いた究極的時計レーザー安定度の追求」(大挑戦型)

×線強度をカウンターで計測する場合、 n 個カウントされた場合、その計測値の不確かさは $\text{root}(n)$ で、カウント数を多くすると正確さが向上する。原子時計の分野では、カウント数には計測時間 τ が相当し、 $\text{root}(\tau)$ に比例して正確さが向上する。

これに対し、「原子位相ロック」という手法でフィードバックをかけることにより、正確さが τ に比例して向上できる、という着想を得て、理論的に検討した論文を発表した。 $\text{root}(\tau)$ で100秒かかる計測が、この手法では10秒の計測で同じ正確さが得られ、計測時間は1桁短縮できる。さらに正確さを求めて、10000秒かかる計測では100秒ですむことになり2桁短縮される。見方を変えると、10000秒もの長い時間がかかる計測が困難な



場合も、100 秒なら計測でき、従来の原子時計でも 1 桁から 2 桁正確さを向上できるようになる。このように、提案された手法は汎用性が高く、様々な原子時計にも応用できるものである。このような新しい発想や提案は、「本当である」ことを実証しなければ受け入れられない。この実証プロセスが大挑戦に値する。

提案したアイデアを実証する為、光原子時計にもマイクロ波原子時計にも採用されているイッテルビウムイオンを選択し、扱いやすいマイクロ波を用いた実証実験を行う計画をたて、全く何もない状態から実験装置を立ち上げた。この装置は、イオントラップ機能、レーザー冷却機能、時計遷移計測機能などから構成されている。まず原子時計として機能する事を確認した後、フィードバックに必要な計測として、トラップしているイオンの状態を壊さない「弱い計測」を目指したが、様々な困難を克服するにはさらなる研究時間が必要であることが明らかとなり、部分的に量子状態を壊す「強い計測」を行う実現性の高い手法に切り替え、実証実験を行った。その結果、さらなる検討や精度の向上など課題を残すものの実証実験に成功した。この成果は 5 年型大挑戦の中間地点としては十二分な成果であると評価でき、今後の研究遂行を強力にサポートすべきだと考える。

すでに立ち上げ、実証実験を行った装置をベースに、Ybイオンマイクロ波時計を標準実用機レベルにまで完成度を高めると共に、可視光レーザーを用いる原子時計に「原子位相ロック」手法を適用し、世界最高精度の光原子時計の実現に挑む。残りの 2 年間で、これらの最終目標が到達可能であることを実証できるものと判断する。

7. 評価者

研究総括 増原 宏 台湾交通大学 応用化学系及び分子科学研究所・講座教授
奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科・特任教授

領域アドバイザー(五十音順。所属、役職は平成 25 年 3 月末現在)

石原 一 大阪府立大学大学院工学研究科 教授

伊藤 繁*1 名古屋大学 名誉教授

小原 實 慶應義塾大学理工学部 教授

熊野 勝文 東北大学マイクロシステム融合研究開発センター 客員教授

小杉 信博 自然科学研究機構分子科学研究所 教授

佐々木 政子 東海大学 名誉教授

七田 芳則 京都大学大学院理学研究科 教授

中島 信昭 豊田理化学研究所 フェロー

三澤 弘明 北海道大学電子科学研究所 所長

美濃島 薫 産業技術総合研究所 イノベーション推進本部 事務局長

三室 守*2 京都大学大学院人間・環境学研究科

宮脇 敦史 脳科学総合研究センター 副センター長

吉原 経太郎 首都大学東京大学院都市環境科学研究科 客員教授

Frans Carl De Schryver*3 Katholieke Universiteit Leuven, Emeritus Professor

Din Ping Tsai*4 台湾中央研究院應用科學研究中心 センター長

Shimon Weiss*5 University of California, Los Angeles, The Dean Willard Chair

Johan Hofkens*6 Katholieke Universiteit Leuven, Department of Chemistry, Professor

*1 平成 22 年 6 月～現在

*2 平成 20 年 6 月～平成 23 年 2 月

*3 平成 21 年 12 月～現在

*4 平成 23 年 4 月～現在

*5 平成 22 年 4 月～現在

*6 平成 24 年 2 月～現在

(参考)

件数はいずれも、平成25年3月末現在。

(1)外部発表件数

	国内	国際	計
論文	0	2	2
口頭	19	8	27
その他	3	1	4
合計	22	11	33

(2)特許出願件数

国内	国際	計
1	0	1

(3)受賞等

なし

(4)招待講演

国際 0件

国内 2件

別紙

「光の利用と物質材料・生命機能」領域 中間評価実施 研究課題名および研究者氏名

研究者氏名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職(平成25年3月末現在) (応募時所属)	研究費(3年間) (百万円)
志賀 信泰 (専任)	原子位相ロックを用いた究極的時計レーザー安定度の追求 (情報通信研究機構)	さきがけ研究者 (情報通信研究機能・研究員)	研究費(3年間) (92百万円)

研究報告書

「原子位相ロックを用いた究極的時計レーザー安定度の追求」

研究タイプ: 大挑戦型

研究期間: 平成20年10月～平成26年3月

研究者: 志賀 信泰

1. 研究のねらい

超高安定な発振器はナビゲーションやタイムスタンプの分野で特に重要な役割を果たし、高安定かつロバスト、軽量、低コスト、低消費電力な原子時計を開発することの重要性は近年ますます大きくなっている。例えば、スマートフォンの普及によって、使用者の位置情報を元にサービスを提供することが当たり前になっていることから、ナビゲーションが今後もその需要を増やし続けることは容易に想像できる。

原子時計は振子となるレーザーの安定度によってその性能が大きく左右されることから、現在多くの研究所で高安定なレーザーの開発に多大な資金と人力が割かれている。しかしながら、共振器をベースにした高安定レーザーの開発は既にアイデアが出尽くしており、原子時計の飛躍的な向上を従来技術の延長で実現することは難しい。

本研究は原子の位相を連続測定することで原子時計の安定度を飛躍的に高める、「原子位相ロック」方式を提案し、従来とは全く異なるアプローチでブレークスルーを実現することをねらいとしている。原子の位相は、基底状態と励起状態の重ねあわせ状態を作ると現れるが、原子の状態を測定すると重ねあわせ状態は普通破壊される。これにより位相も破壊されてしまうため、従来原子の位相がクローズアップされることは無かった。本研究では従来測定のために壊されていた原子の位相を保持することが出来ればある必要な安定度を得るための積算時間を飛躍的に減らすことができるはずであるとの着想に基づき、測定しても原子の位相が壊れないような測定方法を提案した。積算時間が短くなることはダイレクトに原子時計の安定度の向上につながる。

本研究ではイッテルビウムイオンを用いた原子時計を作製し、まずは実験が比較的容易なマイクロ波遷移を用いて実証実験をし、その後同じイオンの光遷移に対して応用することで究極の安定度を有する光時計を開発することを目的としている。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究は、従来測定のために壊れていた原子の位相を保持することで、原子時計の安定度を飛躍的に高められることを提案し、「原子位相ロック」と名付けた[2]。そしてその方式の実証実験を行うためにイオントラップを用いてマイクロ波を振子とする Yb⁺(イッテルビウムイオン)原子時計を作製し、原子位相ロックの実証に成功した。これにより、高安定レーザーの開発以外にも原子時計の性能を高める方策があることを示し、原子時計の開発の研究分野において新たな方向に道を切り拓くことができた。

(2) 詳細

① 原子位相ロックの提案

原子の時計遷移に注目し、基底状態と励起状態の重ねあわせ状態を作ると、波動関数の係数が2準位のエネルギー差に相当する周波数で時間発展する。これをもって「原子の位相」と呼んでいるが、重ねあわせ状態は非常に壊れやすく、原子の状態を通常の方法で測定するだけで壊れてしまう。そのために原子の位相が原子時計において議論されることは少なかった。この従来測定のために壊されていた原子の位相を、「弱い測定(量子力学的な意味で)」を用いて測定することで位相を保持することが原子位相ロックの要点である。本研究提案ではイッテルビウムイオンのマイクロ波標準を例に取り、弱い測定としてファラデー回転を用いることで(図1上参照)100測定サイクル程度の間位相を保持することが出来ると見積もった。これによって、従来法では安定度が $\sqrt{\tau}$ に比例したスピードでしか小さくならないところを、原子位相ロックを用いればより早く、 τ に比例して小さくなる。例えば、0.5秒のプローブ時間で位相ロックを100サイクル繰り返すと、0.5秒から50秒までの間安定度は τ に比例して小さくなり、結果として50秒の積算時間で安定度が通常法に比べて10倍良くなるとのシミュレーション結果を得た(図1下)。尚、50秒よりも長い積算時間では $\sqrt{\tau}$ に比例したスピードで小さくなっているのは、ファラデー回転を用いても位相は少しずつ破壊されるため、50秒毎に位相をリセットしていることに起因している。

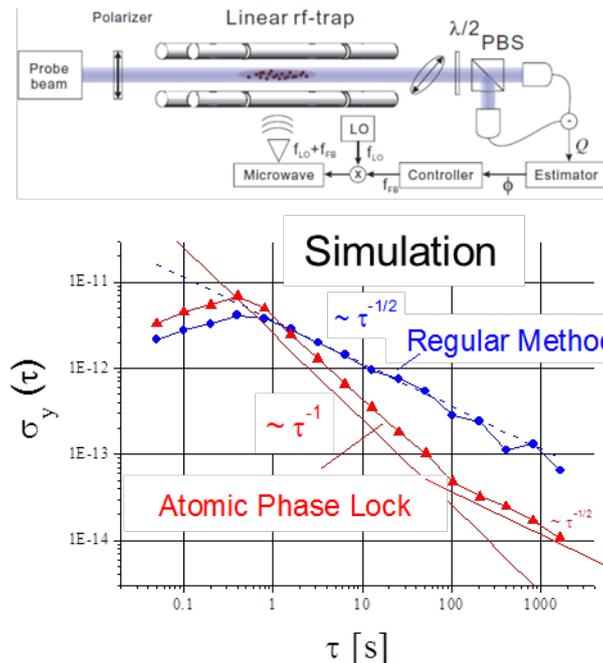


図1. 原子位相ロックの実験配置(上)とシミュレーション結果(下)

② 原子位相ロックの実証実験

- ① 提案を実証するために、まずはイオントラップを作製し、多くの(百万個くらい)イ

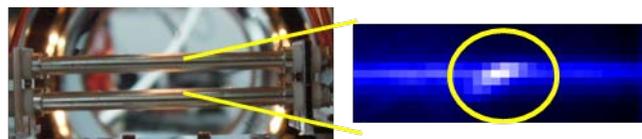


図2イオントラップ(左)とイオンの発光(右)および部分発光(黄丸)

オンを捕獲することを目指した(図2参照)。実際には3万個程度しか捕まらなかったため、弱い測定を用いた原子位相ロックではなく、部分的に発光させることで強い測定を行い、1回の測定では一部の原子の位相しか壊さないことで位相の保持を可能とする「部分発光」の手法を考案、実施した。この方法でイオンの位相を連続的に3回まで正しく測定できることを確認した。その上で3回ずつの位相連続測定を何度も繰り返すことで安定度の評価を行った。(図3参照)

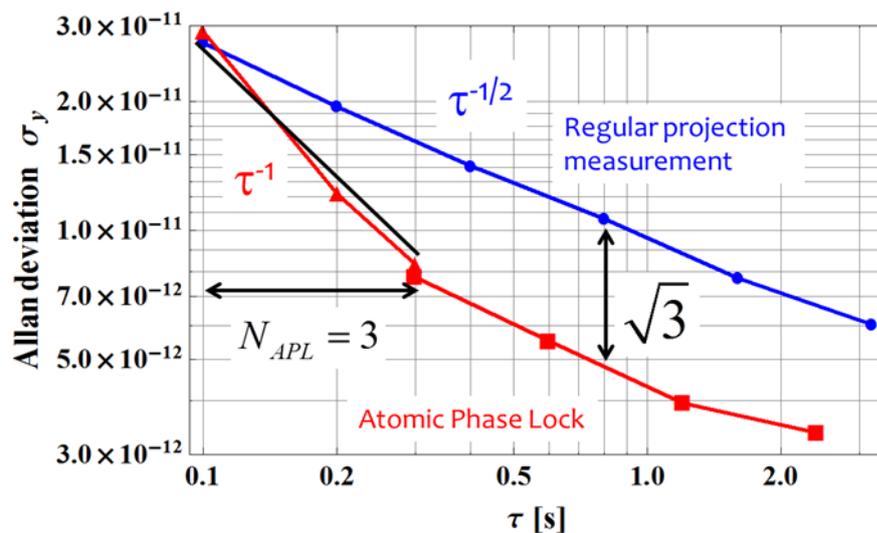


図3. アラン分散の実測プロット。従来法(青)と原子位相ロック(赤)

結果、0.1ms から 0.3ms まで3回の原子位相ロックが行われている(N_{APL} は連続測定の回数)間、安定度が τ に比例して小さくなり、積算時間が0.3秒よりも長い領域ではファクター $\sqrt{3}$ 安定度が向上しているという結果を得、原子位相ロックの提案を実証することが出来た。

3. 今後の展開

今後の実験はマイクロ波標準と光標準の2つの方向性を追求する。

1) 原子位相ロックを適用した Yb+イオンマイクロ波標準実用器への応用

マイクロ波標準器としての完成度を高め、測地天文実験(VLBI 等)などの分野で実際に使用される性能要求を満たすことを目指す。そのために、磁気遮蔽、確度評価、安定度評価を行い、長時間の位相保持のために弱い測定を用いた原子位相ロックの実現も目指す。最終的に測地 VLBI 分野の性能要求を満たすことの出来る、よりコンパクトな新型トラップを開発する予定である。

2) 原子位相ロックの光遷移への適用

原子位相ロックを光遷移へ適用して初めて「究極的時計レーザー安定度の追求」を行うことになる。原子位相ロックの際には多数のイオンを捕獲する必要があるが、多数のイオンを分光する場合、電気四重極子シフトと原子のプローブ中の冷却イオンの加熱の

問題を乗り越えなければならない。言い換えると、今までこれらの困難があるために「イオンを用いた原子時計の場合分光するイオンの数は1つ」が「常識」であったが、この固定概念を覆すところから取り組む必要がある。そのために、光遷移励起用の時計レーザーを開発し、先に述べた問題への対応策を試行していき、固定概念を打ち破る方策を見出しながら最終的に光遷移に対しても原子位相ロックを導入していく予定である。

4. 自己評価

原子位相ロックのアイデアを提案し、イオントラップを用いたマイクロ波遷移に対して原子位相ロックの実証実験を3年半で行うという計画を立てた。当初の提案ではファラデー回転という現象を用いた位相の測定によって連続測定を実現し、原子位相ロックの実証実験を行う予定であったが、イオントラップに捕獲できるイオンの数が当初の計画よりも一桁以上少なかった。このままファラデー回転の実験を進めても信号を十分な S/N 比で得ることが困難であると判断し、測定方法を変更することにした。つまり、強い測定を用いて S/N 比を確保しつつ、発光をイオンのごく一部分に限定することによって位相が壊れる原子の数を制限し、複数回の連続測定を可能にするというアイデアに切り替えて当初の予定時間内に実証実験を成功させた。今後、実用的なマイクロ波標準応用への発展と光時計への応用への発展を目指すための礎を築いたことの意義は大きいと自負している。

5. 研究総括の見解

X線強度をカウンターで計測する場合、 n 個カウントされた場合、その計測値の不確かさは \sqrt{n} で、カウント数を多くすると正確さが向上する。原子時計の分野では、カウント数には計測時間 τ が相当し、 $\sqrt{\tau}$ に比例して正確さが向上する。

これに対し、「原子位相ロック」という手法でフィードバックをかけることにより、正確さが τ に比例して向上できる、という着想を得て、理論的に検討した論文を発表した。 $\sqrt{\tau}$ で100秒かかる計測が、この手法では10秒の計測で同じ正確さが得られ、計測時間は1桁短縮できる。さらに正確さを求めて、10000秒かかる計測では100秒ですむことになり2桁短縮される。見方を変えると、10000秒もの長い時間がかかる計測が困難な場合も、100秒なら計測でき、従来の原子時計でも1桁から2桁正確さを向上できるようになる。このように、提案された手法は汎用性が高く、様々な原子時計にも応用できるものである。このような新しい発想や提案は、「本当である」ことを実証しなければ受け入れられない。この実証プロセスが大挑戦に値する。

提案したアイデアを実証する為、光原子時計にもマイクロ波原子時計にも採用されているイッテルビウムイオンを選択し、扱いやすいマイクロ波を用いた実証実験を行う計画をたて、全く何もない状態から実験装置を立ち上げた。この装置は、イオントラップ機能、レーザー冷却機能、時計遷移計測機能などから構成されている。まず原子時計として機能する事を確認した後、フィードバックに必要な計測として、トラップしているイオンの状態を壊さない「弱い計測」を目指したが、様々な困難を克服するにはさらなる研究時間が必要であることが明らかとなり、部分的に量子状態を壊す「強い計測」を行う実現性の高い手法に切り替え、実証実験を行った。その結果、さらなる検討や精度の向上など課題を残すものの実証実験に成功した。この成果は5年型大挑戦の中間地点としては十二分な成果であると評価でき、今後の研究

遂行を強力にサポートすべきだと考える。

すでに立ち上げ、実証実験を行った装置をベースに、Ybイオンマイクロ波時計を標準実用機レベルにまで完成度を高めると共に、可視光レーザーを用いる原子時計に「原子位相ロック」手法を適用し、世界最高精度の光原子時計の実現に挑む。残りの 2 年間で、これらの最終目標が到達可能であることを実証できるものと判断する。

6. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|---|
| 1. Shiga N., Takeuchi M., “Overcoming the Quantum Projection Noise (QPN) limit without preparation of the Spin-Squeezed State,” <i>Proc. SPIE</i> 8132 , Time and Frequency Metrology III, 813207 (2011) |
| 2. Shiga N., Takeuchi M., “Locking the local oscillator phase to the atomic phase via weak measurement,” <i>New Journal of Physics</i> 14 , 023034 (2012) |

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件

1.

発明者: 志賀 信泰、竹内 誠

発明の名称: 位相保持型ラムゼー法を用いた基準信号発生器および基準信号発生方法

出願人: 独立行政法人情報通信研究機構

出願日: 2010/9/1

出願番号: 特願2010-196254

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【招待講演】

1. 志賀 信泰、「冷却イオントラップ系での量子メモリーのダイナミカルデカップリング」、第 21 回量子情報技術研究会、平成21年11月4日、電気通信大学
2. 志賀 信泰、竹内 誠、「原子位相ロックによる時計の改善」、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2011、平成23年11月29日、大阪大学