

平成30年6月14日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287092

研究課題名(和文) 単一イッテルビウムイオン光時計を用いた微細構造定数の時間変化探索

研究課題名(英文) Exploring temporal variation of the fine structure constant using single-ytterbium-ion optical clocks

研究代表者

杉山 和彦 (Sugiyama, Kazuhiko)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10335193

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：複数の時計遷移をもつYb⁺の特長を生かし、それらの周波数比の測定から微細構造定数の時間変化を探索する。

174Yb⁺ 2S_{1/2} - 2D_{5/2}遷移に加えて、磁場に対して鈍感な171Yb⁺ 2S_{1/2} - 2D_{3/2}遷移の単一イオン分光法を確立した。スペクトルに伴う多数のサイドバンドが、イオンがトラップ中心からずれて増大した非線形振動によること、過剰マイクロ運動の除去でサイドバンドも減少することを突き止めた。これは運動由来の不確かさを低減に直結する。

時計レーザーに光周波数コムを位相同期させる技術を確立し、半導体レーザー励起Yb:KYWレーザーで光周波数比の連続計測を最大3時間可能とした。

研究成果の概要(英文)：We explore a temporal variation of the fine structure constant by measuring frequency ratios between clock transitions in Yb⁺.

In addition to the 2S_{1/2} - 2D_{5/2} transition in 174Yb⁺, we developed single-ion spectroscopy of the 2S_{1/2} - 2D_{3/2} magnetic-insensitive transition in 171Yb⁺. We found that the many sidebands observed in the spectra were caused by nonlinear ion motion enlarged by a displacement of the ion from the trap center, and that they were reduced by eliminating excess micromotions. This leads to improvement of the uncertainties caused by ion motions in the clock transition frequencies.

We developed the phase locking of an optical frequency comb to a clock laser. We realized continuous optical frequency ratio measurement for three hours using a laser-diode pumped Yb:KYW laser.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス 物理定数 イオントラップ 周波数標準 光周波数コム 光時計

1. 研究開始当初の背景

冷却して狭い空間に閉じ込めた原子（分子・イオンを含む）がもつ非常に幅の狭い吸収線には、その周波数を不確かさ 10^{-18} 、すなわち 18 桁も正確に決められると提案されているものがあり、実証されつつある[1,2]. このような吸収線に発振周波数をフィードバック制御したレーザーは光時計とよばれ、マイクロ波領域にある原子の共鳴で定義されている現在の秒、不確かさ 10^{-16} 、の更新が期待されている。この小さな不確かさを活用して、物理の基本定数の時間変化探索という、非常に弱い効果を検出する基礎物理学実験への応用が注目されている[3].

物理の基本定数は、現在の物理モデルの枠組みである標準モデルでは時間変化しない。しかし、標準モデルでは説明できない残された謎を説明する物理理論のなかで、宇宙の暗黒エネルギーの説明をも可能とする革新的な物理理論では、基本定数の時間変化が示唆される。したがって、基本定数の時間変化が検出されれば、これら理論の正しさが証明され、さらにその変化の大きさから適切な物理理論を選ぶことが可能となる。

時間変化探索には単位系によらない無次元の基本定数が望ましく、その 1 つに微細構造定数 α がある。 α が時間変化すれば、原子の吸収線の周波数、すなわち遷移周波数が変化する。遠方のクエーサーが発する電波の吸収など、ずっと過去の現象を観測し α の時間変化が議論されている。一方、もし実験によって時間変化を検出できれば、再現性が確認でき信頼性が高くなる。そこで、 α の変化に対する感度が遷移によって異なることに着目し、2 種類の光時計の周波数の相対変動の観測から、 α の時間変化探索が行われている。測定の不確かさは現在 2.3×10^{-17} 年に達しているが、有意な時間変化は検出されていない。この測定は米国標準技術研究所 (NIST) においてアルミニウムイオンと水銀イオンの光時計の比較から決定された[3]. 我々はこれを上回る不確かさでの探索を目指して研究を進めた。

- [1] Chou et al., PRL 104, 070802 (2010).
- [2] Katori, Nat. Photon., 5, 203 (2011).
- [3] Rosenband et al., Science, 319, 1808 (2008).

2. 研究の目的

2 種類の光時計の比較による α の時間変化の探索には、 α の変化に対する感度が大きく異なる遷移を選ぶ必要があり、通常は 2 種類の原子を用いる。我々はイッテルビウムイオン (Yb^+) が $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{F}_{7/2}$ 遷移と $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ (あるいは $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$) 遷移という、符号の異なる大きな感度をもつ時計遷移をもつことに

注目した。この場合、1 台のトラップに閉じ込めた同じ単一 Yb^+ を用いて、異なる 2 つの光時計を構築できる (図 1)。このことは、装置の多くが 1 系統だけですし、効率よく実験が進められること以上に利点をもたらす。1 台のトラップ装置を利用するため、遷移周波数を変動させるじょう乱が 2 種類の時計遷移で共通になる。したがって、重力場のような相対変化が等しいじょう乱は比をとると取り除くことができる。じょう乱に対する感度が 2 種類の時計遷移で違う場合でも、じょう乱が共通であることを利用してより正確に評価できる、あるいは周波数比であれば直接じょう乱を取り除いた値を外挿して決定することができる。これを単一イオン光時計の不確かさを制限する大きな要因である、トラップの不要直流電場により発生する電気四重極シフトなどに適用し、不確かさの低減を図る。さらに、 α の時間変化に対してほぼ同じ感度をもつ $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ と $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移の比較を取り入れ、他の変動要因の有無の検証を同時に行う。感度差の大きい $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{F}_{7/2}$ 遷移との比較のみで時間変化が検出されれば、検出がより確実になる。

本研究は、ほかのイオン種では実現できない 1 台のトラップ中の同じイオンを用いた 2 種類以上の光時計を実現して不確かさを低減し、現在の制限値 2.3×10^{-17} 年を上回る不確かさで α の時間変化を探索することを最終目標とする。本研究で α の時間変化が検出されれば、標準モデルを超える理論物理学が大きく前進する。実用上は全く問題ないレベルであるが、いつでもどこでも変化しないという再現性の公理で成り立っている秒の定義の破綻は、我々の世界観にも大きな影響を及ぼすであろう。

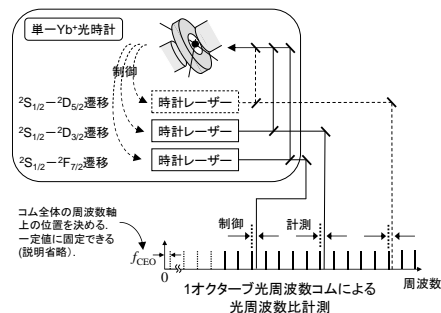


図 1 単一 Yb^+ 光時計の光周波数比計測。

3. 研究の方法

- 最終目標を達成するために、
- (1) 光時計の周波数変動を抑え（周波数安定度を高め）統計的な不確かさを低減する、
 - (2) 周波数シフトの要因を低減する方法を導入し不確かさを低減する、
 - (3) 光周波数比計測装置である光コム装置を改良する、
 - (4) 光周波数比計測手法を改良する、

(5) 長期間にわたる繰り返し測定が容易なシステムを構築する。

1 台のトラップの同じ 1 個のイオンを用いる方法は、(4)計測手法の改良によって、(2)不確かさの低減を図ることに対応する。

(1)周波数安定度改善について、単一イオンを用いる場合、原子数が 1 個と吸収線の信号対雑音比 (S/N) は最悪である。その吸収線を用いて周波数安定化されるレーザー (時計レーザー) の周波数変動を検出するには積算時間が必要で、フィードバック制御が始まるまでに約 100 秒必要となる。この 100 秒程度までの周波数変動は、時計レーザー単独で低減する。

時計レーザーは、単一イオンのスペクトル幅がきわめて狭いため、まず光共振器の共鳴に高速制御し、その発振線幅を 1 Hz レベルに狭窄化する。そのために、(i)光共振器の共鳴に対して発振線幅を相対的に 1 Hz 以下に制御する、(ii)光共振器の共鳴周波数が変動しないように、光共振器の防音や除振を行い実線幅 1 Hz を実現する、さらに、(iii)光共振器を構成する素材の経年変化や温度変動により、光共振器の共鳴周波数の変動は 1 秒程度から大きくなる。この 1 秒程度から単一イオンによる制御が始まる 100 秒程度までの周波数変動を低減する工夫をする。

(iii)については、光共振器の素材が熱膨張率ゼロとなる温度に温度制御する方法がよくとられる。しかし、熱膨張率ゼロ温度は通常指定できないため、それが室温以下であった場合は冷却する必要があり熱設計が難しい。我々は逆に真空槽を断熱して温度変化ができるだけ緩慢な系を作る。そして、まず一定の時間間隔で単一イオンの吸収線を検出して光共振器の共鳴の時間変動を測定し、これをあらかじめ補正してからイオンの吸収線に安定化する方法を試す。

時計遷移の上準位へイオンが励起されたかどうかは、蛍光をよく発する寿命の短い遷移をレーザーで駆動して蛍光を観測し、寿命の長い時計遷移の上準位へ励起されると蛍光が観測されなくなることから判定する。この試行を繰り返すと遷移確率が決まり、時計レーザーの周波数を掃引して遷移確率を測定していくと単一イオンで吸収線が得られる。ここで、蛍光強度が大きいほど、蛍光の消失を判定するまでに要する時間を短くでき、制御開始時間を早くすることができる。この改善も同時に目指す。

研究開始時には 1 台のトラップ装置で単一 $^{174}\text{Yb}^+ \ ^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移が検出できていた。この装置を用いてほかの遷移の検出技術を確認する。同時に 2 台目のトラップ装置を構築し、同一の遷移で不確かさの評価を進める。トラップが 2 台体制となるので、交互に改良

を加えて、不確かさが低減された装置を実現していく。そして、最終目標である、1 台のトラップ装置に捕捉した 1 個のイオンを用いて 2 種類の光時計を構築し、さらなる不確かさを低減を図る。

(3)光周波数コム装置の改良について、研究開始時には、モード同期チタニウム・サファイア (Ti:Sa) レーザーを用いた光コムで、周波数比計測の目処がたっていた。しかし、光コムを時計レーザーに位相同期させるところで位相雑音が付加されていて、時計レーザーの発振線幅を光コムのモード線幅に移すには至っていない。制御を高速化し、これを解決する。

さらに、長時間連続測定を可能にするため、半導体レーザー直接励起によるモード同期 Yb:KYW 固体レーザーで、光周波数比計測システムを実現する。まずは、コム全体の周波数軸上の位置を決めるオフセット周波数を、基準周波数へ位相同期させる。そして、上記の時計レーザーへの位相同期技術を移転し光周波数比計測システムを完成させる。

4. 研究成果

(1) 新たな時計遷移の検出と改良

Yb⁺光時計では、磁場に鈍感な奇数同位体 $^{171}\text{Yb}^+$ を用いることが、不確かさを低減するために重要である。一方、奇数同位体は超微細構造をもつため準位構造が複雑で、レーザー冷却が難しく、また、時計遷移分光の手順も複雑になる。本研究開始前にレーザー冷却技術は確立していたので、本研究は分光手順の確立、すなわち基底準位 $^2\text{S}_{1/2}$ の超微細構造準位 $F=0$ に $^{171}\text{Yb}^+$ を初期化する技術の確立から開始した。そして、単一 $^{171}\text{Yb}^+$ で $^2\text{S}_{1/2}(F=0) - ^2\text{D}_{3/2}(F=2)$ の超微細構造間の時計遷移スペクトルを検出する方法を確立した。適切な磁場を印加し、磁気量子数の異なる 5 つの成分を周波数軸上で分離し、それらの中央にある磁場に鈍感な成分を同定した。その成分をさらに高分解能で分光し、イオンの運動により発生するサイドバンドを分離してドップラーシフトのないキャリアスペクトルを抽出した。

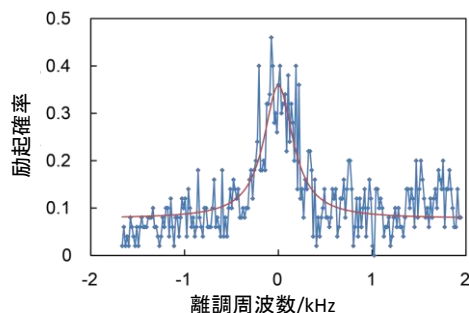


図 2 単一 $^{171}\text{Yb}^+ \ ^2\text{S}_{1/2}(F=0, m_F=0) - ^2\text{D}_{3/2}(F=2, m_F=0)$ 遷移のキャリアスペクトル。

スペクトルの分解能を改善するために、時計レーザーの周波数変動を補正した。時間において複数回スペクトルを検出して時計レーザーの周波数変動をあらかじめ測定し、測定結果から求めた線形の変動分をあらかじめ補正しながら高分解能に周波数掃引を行って分光した。レーザー周波数を低周波方向と高周波方向の2方向へ掃引してスペクトルを検出し、補正しきれなかった時計レーザー周波数の時間変動分を取り除き、スペクトル幅を380 Hzまで狭めることができた(図2) [論文④]。これにより、スペクトル幅が時計レーザーの発振線幅で制限される値近くまで狭くなったことを確認した。

(2) 第2イオントラップ装置の開発

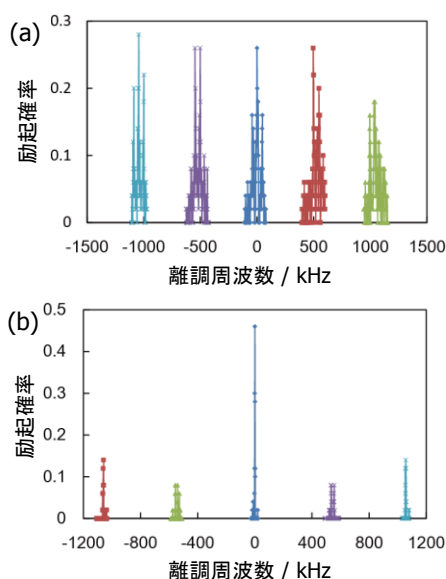


図3 単一 $^{174}\text{Yb}^+$ $2\text{S}_{1/2} - 2\text{D}_{5/2}$ 遷移スペクトルのサイドバンド. マイクロ運動最小化が (a) 1方向, (b) 3次元.

光時計の不確かさを評価は、まず同じ遷移の光時計を2台構築し相互に比較して行う。比較用の第2イオントラップ装置を立ち上げ、超微細構造がなくレーザー冷却が簡単な偶数同位体174の単一イオンで、 $2\text{S}_{1/2} - 2\text{D}_{5/2}$ 遷移のスペクトルを検出した。第2イオントラップ装置では、レーザー冷却用レーザーを2方向から照射できるように改良し、トラップの軸対称性が完全な場合でも3次元ともレーザー冷却ができるようにした。

同時に時計遷移スペクトルの改良を進めた。単一イオンの時計遷移スペクトルには多数のサイドバンドが観測された。これは、トラップポテンシャルのひずみ、すなわち、ポテンシャルの非線形性から生じるイオンの非線形振動が原因であることが明らかになった。非線形振動は、イオンがトラップ中心から離れるほど顕著になる。一方、不要な静電場によってイオンがトラップ中心からずれると、トラップに用いている高周波電場が大きくなり、マイクロ運動とよばれるこの

電場による振動も大きくなる。したがって、不要静電場を打ち消してマイクロ運動の最小化を進めると、イオンの位置がトラップ中心に近くなり、サイドバンドの数と大きさも同時に小さくなると予想した。これまで1本の冷却レーザーで測定できる1方向のみのマイクロ運動を最小化して分光実験を進めてきたが、2方向の冷却レーザーを用いて最小化した後に、トラップポテンシャルを振幅変調して3次元とも最小化を進めた。その結果、予想通りサイドバンドの数と大きさが低下し、仮説が裏付けられた(図3)。この結果は、マイクロ運動による2次のドップラーシフトや近傍サイドバンドによるキャリアスペクトルの変形など、イオンの運動に伴い発生する不確かさの低減に直結する成果となった。このような報告例は知る限りなく、現在論文執筆を進めている。

(3) 時計レーザーの改良

(4)で述べる光周波数コムによる線幅転送技術によって、波長の異なる時計レーザーの性能評価が進み、研究開始当初より疑念があった制御回路の問題が明らかになった。制御回路を改良により、光共振器の共鳴に対する相対線幅を10 Hz未満に改良した。さらに、制御回路のオフセットドリフトの問題も明らかになり、これを改良した。

最もスペクトル幅が狭く、かつ α の変化に対する感度が高い $2\text{S}_{1/2} - 2\text{F}_{7/2}$ 遷移の時計レーザーを完成させた。高出力化のためにテーパ型半導体素子を外部共振器型レーザーとして用いている。連続周波数掃引幅を通常の外部共振器型半導体レーザーと同等まで改良し、光共振器を用いた第2高調波発生においてモードマッチングを改良して変換効率を改善した。

(4) 光周波数コムの改良

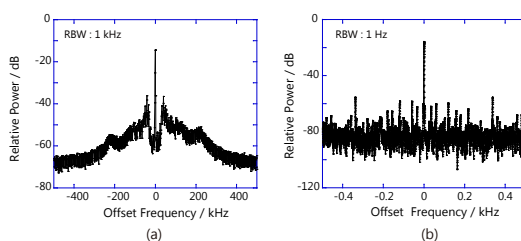


図4 モード同期Ti:Saレーザーによる光コムを時計レーザーへの位相同期させたときのビートスペクトル. (a)(b)はスペクトラムアナライザのスパンの違い.

モード同期Ti:Saレーザーを用いた光コムに、 piezo素子を用いた高速で位置制御可能なミラーを導入し、時計レーザーに光コムを完全に位相同期させる技術を確認した。これにより周波数比計測の高速化を可能とするとともに、離れた波長のレーザーのスペクトル

ル線幅を比較・評価すること、ならびに、他の波長へレーザーの線幅を転送することを可能とした[論文②]。高速ピエゾ制御ミラーによる光コム位相同期は、我々の知る限り、初めて実現されたものである。

光周波数比の長時間連続測定に向けて、半導体レーザー直接励起 Yb:KYW レーザーによるコム位相同期の開発を進めた。オフセット周波数の線幅を制御帯域よりも狭めることに成功し、RF 基準周波数へ位相同期を達成した。これにより、GPS 時計を基準とした光周波数計測が可能となり、時計レーザーの周波数の時間変動を検出した[論文①]。さらに、開発した高速で位置制御可能なミラーをこちらにも導入し、時計レーザーに位相同期させる技術を確立した(図5)[論文③]。横モード縮退を利用したモード同期で実現した世界唯一の光コムで、光アンプを必要としない高効率と、低雑音の特長をもつ。2 時間は位相同期を継続させることができ、長時間連続測定可能なシステムの実現に向けて大きく前進した。

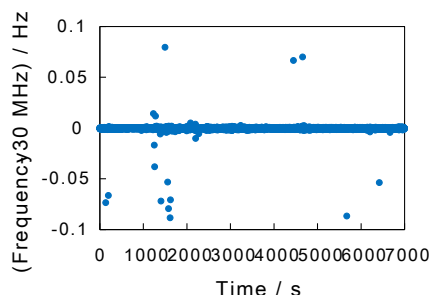


図5 モード同期 Yb:KYW レーザーによる光コムを時計レーザーへの位相同期させたときのビート周波数の変動。周波数カウンタの平均化時間は 1 秒。

(5) 今後の展開

ここまで 2 つの時計遷移のスペクトルを単一イオンで検出し、 $^2S_{1/2}-^2F_{7/2}$ 遷移の時計レーザーの準備も進んだ。今後は、2 台のトラップ装置を利用して改良を進めながら、時計遷移スペクトルへのレーザーの安定化と不確かさ評価をすすめる。これを実現するために、現在初代のトラップ装置も 3 次元レーザー冷却が可能な構造に改良し、実験を進めている。そして、 $^2S_{1/2}-^2F_{7/2}$ 遷移の検出も果たし、最終目標である 1 台のトラップに閉じ込めた 1 個の Yb⁺を用いて、異なる 2 つの遷移周波数の時間変化を探索する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

① M. Mitaki, K. Sugiyama, and M. Kitano, “Octave-spanning optical frequency comb based on a laser-diode pumped Kerr-lens

mode-locked Yb:KYW laser for optical frequency measurement,” *Applied Optics*, 査読有, Vol.57, 2018, 5150-5160. <https://doi.org/10.1364/AO.57.005150>

② S. Hatanaka, K. Sugiyama, M. Mitaki, M. Misono, S.N. Slyusarev, M. Kitano, “Phase locking of a mode-locked titanium-sapphire laser-based optical frequency comb to a reference laser using a fast piezoelectric actuator,” *Applied Optics*, 査読有, Vol.56, 2017, 3615-3621. <https://doi.org/10.1364/AO.56.003615>

③ M. Mitaki, K. Sugiyama, and M. Kitano, “Application of optical frequency comb based on laser-diode pumped Kerr-lens modelocked Yb:KYW laser to optical frequency measurement and phase locking to optical reference frequency,” *OSA Technical Digest (online) of Advanced Solid State Lasers*, 査読有, 2016, JTU2A.26. <https://doi.org/10.1364/ASSL.2016.JTU2A.26>

④ Y. Imai, T. Nishi, M. Nishizaki, S. Kawajiri, Y. Muroki, R. Ikuta, K. Matsumoto, M. Kitano, and K. Sugiyama, “Single-ion spectroscopy system for the $^2S_{1/2}(F=0)-^2D_{3/2}(F=2)$ transition in $^{171}\text{Yb}^+$,” *Radio Science*, 査読有, Vol.51, 2016, 1385-1395. <https://doi.org/10.1002/2016RS006073>

⑤ K. Sugiyama, Y. Imai, M. Mitaki, T. Momiyama, Y. Ideta, S. Higashitani, H. Fujisaki, S. Hatanaka, and M. Kitano, “Development of single ytterbium- and barium-ion optical clocks towards search for the temporal variation of fine structure constant,” *Proceedings of 7th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2014*, 査読無, 2015, 45-51.

[学会発表] (計 43 件)

① Y. Imai, “Improvement of single-ion spectroscopy of quadrupole transitions in ytterbium ions towards search for temporal variation of the fine structure constant,” *The Tenth International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2018)*, 2018.

② 今井康貴, 杉山和彦, 入江連, 北野正雄, “RF トラップに閉じ込めた単一イオンの時計遷移分光で観測されるサイドバンドの解析,” *日本物理学会 2017 年秋季大会*, 2017.

③ 友松 駿介, 杉山 和彦, 今井 康貴, 入江連, 三滝 雅俊, 北野 正雄, “Yb⁺ $^2S_{1/2}-^2F_{7/2}$ 時計遷移励起用レーザーシステムの開発

(II),” 日本物理学会第72回年次大会, 2017.

④ K. Sugiyama, “Single Yb⁺ and Ba⁺ ion spectroscopy and development of optical frequency comb towards search for temporal variation of the fine-structure constant,” The 9th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2017)

⑤ 入江 連, 今井 康貴, 杉山 和彦, 北野 正雄, “2 方向からの冷却レーザー照射によるトラップした単一 ¹⁷⁴Yb⁺ の冷却評価,” 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016.

⑥ Y. Imai, K. Sugiyama, R. Irie, and M. Kitano, “Single-ion spectroscopy of two quadrupole transitions in ytterbium ions towards search for temporal variation of the fine structure constant,” The 25th International Conference on Atomic Physics (ICAP2016), 2016.

⑦ K. Sugiyama, “Development of single Yb⁺ and Ba⁺ optical clocks and frequency combs towards search for temporal variation of the fine structure constant,” The 8th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2015), 2015. (招待講演)

⑧ Y. Imai, K. Sugiyama, and M. Kitano, “Observation of the magnetic insensitive clock transition in the ²S_{1/2}(F=0) – ²D_{3/2}(F=2) transitions in single ¹⁷¹Yb⁺,” 2015 URSI-Japan Radio Science Meeting, 2015

⑨ 東谷 祥平, 今井 康貴, 杉山 和彦, 北野 正雄, “光時計の不確かさ評価に向けた 2 台目 Yb⁺ イオントラップの作製,” 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015.

⑩ 杉山 和彦, “遷移周波数の精密計測による基礎物理定数の時間変化探索,” 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015. (招待講演)

⑪ H. Fujisaki, K. Sugiyama, Y. Imai, and M. Kitano, “Laser-diode-based light source for single-ion spectroscopy of the ²S_{1/2} – ²D_{5/2} clock transition in Ba⁺ at 1.76 μm,” The 6th International Conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics (TCP2014), 2014.

⑫ M. Mitaki, K. Sugiyama, and M. Kitano, “Frequency stabilization of optical frequency comb using laser-diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser for long-term continuous operation,” 2014 Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL2014), 2014.

⑬ 杉山 和彦, “微細構造定数の時間変化探索を目指した Yb⁺ と Ba⁺ の単一イオン光時計の開発”, RCNP 研究会 – CP violation in elementary particles and composite systems, 2014.

⑭ Y. Imai, K. Sugiyama, S. Higashitani, and M. Kitano, “Spectroscopy of the ²S_{1/2} – ²D_{3/2} transition in single ¹⁷¹Yb⁺ towards search for temporal variation of the fine structure constant,” European Conference on Trapped Ions (TCTI2014), 2014.

⑮ 畑中 修平, 杉山 和彦, 三滝 雅俊, 今井 康貴, 北野 正雄, “1 オクターブ光周波数コムによる Yb⁺ 時計遷移の光周波数比計測システム II,” 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

本研究からの支出はないが、精密計測を基礎物理学へ応用する研究を中心としたワークショップ FPUA2017 を実行委員長として開催した。

<http://cycgw1.cyric.tohoku.ac.jp/fpua2017/>

アウトリーチ活動

杉山 和彦, 今井 康貴, 三滝 雅俊, 藤崎 広豊, 西田 圭佑, 友松 駿介, “基礎物理学を目指す単一イオン光時計,” 京大アカデミックデイ, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山 和彦 (SUGIYAMA, Kazuhiko)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10335193

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

北野 正雄 (KITANO, Masao)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70115830

(4) 研究協力者 なし