

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21104006

研究課題名(和文)単一イオン光時計による基礎物理定数の時間変化の探索

研究課題名(英文)Search for temporal variation of the fundamental constants by using single-ion optical clocks

研究代表者

杉山 和彦(Sugiyama, Kazuhiko)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10335193

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 153,500,000円、(間接経費) 46,050,000円

研究成果の概要(和文)：Yb⁺とBa⁺の異なる遷移を基準とする単一イオン光時計を構築し、それらの周波数比を測定して微細構造定数の時間変化を探索する。その検出は、暗黒エネルギーを解明する理論構築の糸口となる。

174Yb⁺ 2S_{1/2}-2D_{5/2}、不確かさのより小さい171Yb⁺ 2S_{1/2}-2D_{3/2}遷移のスペクトルを単一イオンで検出し、複数遷移の光時計構築にめどが立った。光周波数比計測を実現し、長時間動作をYb:KYWレーザーで進めた。線幅1 Hzの時計レーザー、平面型トラップによる蛍光検出効率の改良、他の遷移への対応を含め、要素技術をほぼ開発した。光時計の不確かさを測定し、時間変化探索を近く開始できる。

研究成果の概要(英文)：We aim at search for a temporal variation of the fine structure constant by frequency-ratio measurement between the single-ion optical clocks, of which references are different transitions in Yb⁺ and Ba⁺. Detection of a temporal variation will lead to a new theory which reveals the origin of the dark energy.

We succeeded in single-ion spectroscopy of the 2S_{1/2}-2D_{5/2} transition in 174Yb⁺, and then, 2S_{1/2}-2D_{3/2} in 171Yb⁺ of a potential of better uncertainty, and the success enables us to realize the optical clocks of different transitions. We realized optical frequency-ratio measurement, and are developing a system of long-term continuous operation with a Yb:KYW laser. We achieved almost all the techniques required, including a clock laser with a 1-Hz linewidth, a surface trap of better detection efficiency of the fluorescence, and preparations for other clock transitions. We will measure uncertainties of the clocks, and start searching a temporal variation in the near future.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子分子量子エレクトロニクス

キーワード：物理定数 量子エレクトロニクス 超精密計測 原子分子物理 高性能レーザー

1. 研究開始当初の背景

物理の基本定数は、現在の理論枠組みでは時間的空間的に不変である。しかし、宇宙の暗黒エネルギーを説明するさまざまな革新的理論では変化する可能性が示唆されていて、変化の検出は新たな理論構築の方向性を決定する。微細構造定数は無次元であるため、変化の探索には理想的である。遠方のクエーサーのスペクトル観測などから、時間変化が議論されてきた。

一方、実験室で繰り返し測定が可能な検出方法があれば、信頼性が高まる。原子のエネルギー準位は γ の変化に対して異なる依存性を示す。エネルギー準位間の遷移周波数は、原子時計の基準として用いられている。そこで、異なる遷移を基準とする原子時計の相対的な時間変化を観測し、 γ の時間変化を探索する。とくに、光領域の遷移を基準とする光時計は、現在のマイクロ波原子時計を越える不確かさ 10^{-18} 台が提案されている。また、2000年に開発された光周波数コムを用いて、不確かさを損ねることなく光時計の周波数を比較することが可能となった。現在の γ の時間変化の上限値は、2008年までに米国標準技術研究所で測定されたもので、単一 Al^+ と Hg^+ の遷移を基準とする光時計の比較による 2.3×10^{-17} /yr である。

2. 研究の目的

1. で述べた状況のもとに、本計画研究では、元素や種類の異なる単一イオン光時計を3種類構築し、それらの周波数比の時間変化を測定して γ の時間変化を探索する。具体的には Yb^+ と Ba^+ の遷移に対して測定を行う(図1)。

に対する感度が異なる2つの時計遷移をもつ Yb^+ では、同一のイオンで異なる2種類の遷移を比較して重力場の周波数シフトを除外し、不確かさ 10^{-18} 台の測定を目指す。また、 Ba^+ を含む3種類の遷移の比較によって、感度や信頼性を向上させつつ、他の物理定数の時間変化についても探索を可能にする。

時間標準の精密化は暗黒エネルギー解明の糸口となるとともに、物理研究や現実生活に大きなインパクトを与えよう。

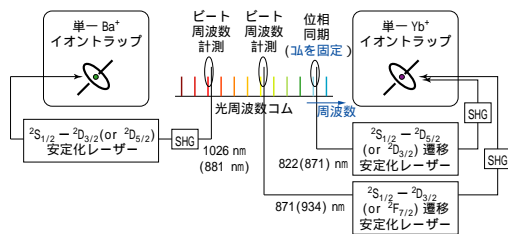


図1 光時計の周波数比計測の概略図

3. 研究の方法

光時計による γ の時間変化探索を行うた

めに必要となる、以下の3つの要素の開発を進める。(図1、図2参照)

- (1) 単一イオン光時計の構築。
 - (2) 複数遷移化。
 - (3) 光周波数比計測システムの開発。
- 最終的にこれらを統合し探索を行う。

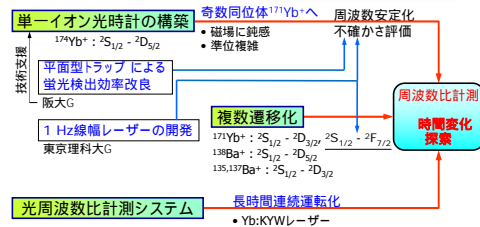


図2 研究方法全体図

(1) 単一イオン光時計の構築

技術的に最も簡単な偶数同位体 $^{174}Yb^+ \ 2S_{1/2} - 2D_{5/2}$ 遷移で単一イオン光時計を構築し、技術を確立する。以下の手順で進める。

1次ドップラーシフトを取り除くために、単一イオンをレーザー冷却し、波長サイズ以下の領域(ラム-ディッケ領域)に閉じ込める。

時計の基準とする遷移(時計遷移)を励起するレーザー(時計レーザー)を準備する。単一イオンで時計遷移のスペクトルを検出する技術を確立する。

スペクトルに時計レーザーの周波数を安定化する。2台のシステムを構築して周波数シフトを評価し、時計の不確かさを決定する。

時計レーザーの発振線幅は、周波数ゆらぎの低減、ひいては測定時間の短縮に重要である。とくに、 γ の変化に対して感度が最も高い $Yb^+ \ 2S_{1/2} - 2F_{7/2}$ 遷移は、上準位の寿命が約10年とスペクトル幅が極めて狭い。また、測定時間の短縮には、スペクトル取得の高速化も重要である。そこで、

上記に関連して、レーザーの発振線幅1 Hz以下を目指す。これは、東京理科大Gで開発を進める。

上記に関連して、蛍光の集光効率の高いトラップを開発する。これは、阪大Gで開発を進める。また、阪大Gは優れたトラップ技術をすでに獲得している。その協力によって、京大Gの研究を加速する。

(2) 複数遷移化

$^{174}Yb^+ \ 2S_{1/2} - 2D_{5/2}$ 遷移で確立した技術を、ほかの遷移へ拡張する。

不確かさの小さい光時計を構築するために、磁場に対する周波数シフトが鈍感な奇数同位体 $^{171}Yb^+$ へ移行する。超微細構造をもつため難しくなる、レーザー冷却と分光手段を確

立し、 ${}^2S_{1/2} - {}^2D_{3/2}$ 遷移の光時計を構築し、複数遷移化を果たす。

${}^{171}\text{Yb}^+$ で ${}^2S_{1/2} - {}^2F_{7/2}$ 遷移の光時計を構築する。

平行して Ba^+ の光時計構築を進める。 Ba^+ の奇数同位体 135、137 は電場に対する周波数シフトが極めて小さい時計遷移をもつ。近傍のイオンの電荷の影響を受けないので、イオン数を増やして信号強度を上げ、周波数安定度を高める。 ${}^{135,137}\text{Ba}^+$ の準位構造は ${}^{171}\text{Yb}^+$ よりさらに複雑なので、まず偶数同位体 ${}^{138}\text{Ba}^+$ で光時計構築を目指す。

(3) 光周波数比計測システムの開発

光周波数比計測は、光周波数コムを1方の光時計に位相同期させ、もう一方の光時計とコムの別のモードとのビート周波数を測定して行う。

自作のモード同期チタニウム・サファイア ($\text{Ti}:\text{Sa}$) レーザーを用いたコムで、システムを構築する。

$\text{Ti}:\text{Sa}$ レーザーは高出力の励起レーザーを必要とし、本研究で必要となる長時間連続運転に向かない。低パワーの半導体レーザー直接励起で発振するモード同期レーザーを開発し、長時間連続運転可能なシステムを開発する。

4. 研究成果

(1) 単一イオン光時計の構築

${}^{174}\text{Yb}^+ {}^2S_{1/2} - {}^2D_{5/2}$ 遷移で単一イオン光時計の構築に必要な技術を獲得していった。

単一イオンのレーザー冷却技術の確立

1 mm サイズの小型トラップを用いて、単一イオンをラム - ディック領域に閉じ込める技術を確立した。そのために (i) 単一イオンの導入、(ii) マイクロ運動の最小化、および (iii) 光ポンピング防止による冷却サイクルの確保、の各技術を確立した。

(i) は、光イオン化を用いてトラップ中で中性原子を1個ずつイオン化し捕捉する技術を確立した。(ii) マイクロ運動とは、イオンをトラップするための RF 電場によるイオンの運動で、不要な静電場を打ち消してイオンをトラップ中心に捕捉すると最小となる。蛍光と RF 電場との時間相関を測定しマイクロ運動を高感度に検出する技術、RF 光子相互相関法を、すでに確立している阪大 G の手法を参考に導入し、この問題を解決した。(iii) レーザー冷却中に特定の磁気副準位への光ポンピングが発生しレーザー冷却が滞る問題は、環境磁場とレーザーの偏光を最適化して解決した [16]。

ここまでの研究で独自性のある要素技術、

2 台の半導体レーザーの和周波を両波長に共鳴する外部共振器で発生させた Yb^+ のレーザー冷却光源 [11]、 Yb 光イオン化の基本的特性 [8]、および存在比の小さい同位体へのレーザーの同調方法 [7]、を論文化した。

時計レーザーの線幅狭窄化

${}^2S_{1/2} - {}^2D_{5/2}$ 遷移の2倍の波長、822 nm の外部共振器型半導体レーザー (ECLD) を光共振器の共鳴に高速制御して線幅を狭窄化した。

東京理科大 G では、フィネス 30 万のきわめて鋭い共鳴をもつ光共振器を熱膨張 0 となる温度に制御し、光共振器の振動や音響ノイズを除去する方法を工夫して、線幅 0.8 Hz 以下のレーザーを開発した (図 3) [2]。この成果をもとに、京大 G では垂直方向の振動に鈍感な縦置き光共振器やアクティブ除振台を導入し、線幅狭窄化を進めている。

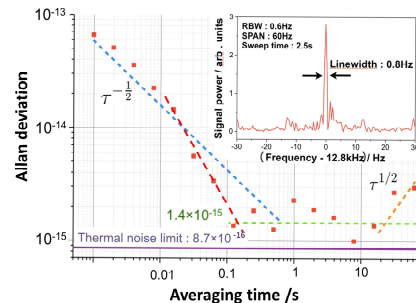


図 3 狭線幅レーザー2台のビートによる評価。カウンタで測定した周波数ゆらぎ (Allan 偏差)。光共振器の熱ゆらぎ制限 (紫線) 近くまで安定化。(図中図) ビートスペクトル。

また、東京理科大 G では原子干渉計を用いてレーザーの位相ゆらぎを測定し、線幅を評価する方法を開発した。原子干渉計の位相ゆらぎがこれまでの 1/100 に減少し、可干渉距離が大きく改善された。これらを含む原子干渉計に関する研究を、複数の論文にまとめた [4, 9, ほか]。

${}^{174}\text{Yb}^+ {}^2S_{1/2} - {}^2D_{5/2}$ 遷移単一イオン分光

単一イオン分光は以下の手順で行う。まず、レーザーを一定時間照射し、上準位に励起されたかどうかを量子跳躍信号の有無から判定する。この試行を繰り返して遷移確率を決定する。そして、時計レーザーの周波数を掃

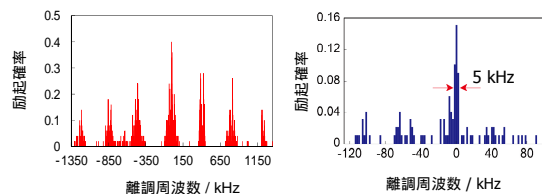


図 4 単一 ${}^{174}\text{Yb}^+$ 波長 411 nm ${}^2S_{1/2} - {}^2D_{5/2}$ 遷移のスペクトル。(左) 遷移周波数 (キャリア、中央のスペクトル) とイオンの運動によるサイドバンド、(右) キャリアのみ拡大。

引しながら励起確率を測定しスペクトルを得る。その結果、トラップ中のイオンの調和振動によるサイドバンドが明瞭に分離され、キャリアに関しては幅 5 kHz まで狭いスペクトルを観測することに成功した(図 4) [3]。

蛍光強度は、時計遷移のスペクトルを検出に要する時間を決めるので、光時計の周波数安定度を制限する。阪大 G ではこれを改善するために、電極が平面状でイオンの蛍光を大きな立体角で集光できる、平面型トラップの開発を進めた。蛍光の集光効率を同 G 比で約 4 倍に高め、時計遷移の励起を高速で検出した(図 5) [14]。

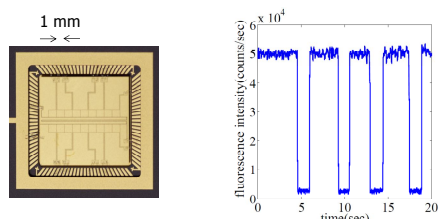


図 5 (左)作成した平面型トラップ、(右)単一 $^{40}\text{Ca}^+$ 時計遷移の量子跳躍信号。

これに先立ち、従来方法では電極に垂直方向のマイクロ運動が検出不可能だった問題を、パラメトリック共鳴を利用して 1 方向のレーザー光で 3 次元とも検出する、新しい方法を考案し解決した[6,12]。また、トラップ領域を 2 列に拡大し個数を増加させる、新しいトラップを考案し実証した。[1 (編集者による research highlight に選定)]

不確かさ評価に向けて

不確かさの決定は、2 台の光時計を相互に比較して行う。そのために必要となる 2 台目のトラップ装置を立ち上げた。同時に 2 台のトラップでレーザー冷却を行うために、冷却レーザーの出力増強に取り組み、現在ほぼ達成した。不確かさ評価に入るまであと一歩のところまで進捗したと考える。

(2) 複数遷移化

奇数同位体 $^{171}\text{Yb}^+$ のレーザー冷却と $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 遷移の単一イオン分光

奇数同位体は超微細構造をもちレーザー冷却が難しい。超微細構造間に生じる光ポンピングを防ぐために、偶数同位体のときよりも 2 台多くレーザーを準備し、適切な静磁場を印加することにより、偶数同位体と同等の温度まで冷却した[16]。

引き続き $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 遷移の時計遷移分光を行った。時計レーザーは、 $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移用と同じ光共振器を用いて線幅狭窄化した。 $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ と $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ を比較するとき、光共振器由来の周波数ゆらぎを共通にしてキャンセルさせることを狙う。

$^{171}\text{Yb}^+$ では超微細構造を逆に利用し、レーザー冷却サイクルに入っている $^2\text{D}_{3/2}$ 準位を時計遷移に利用できる。そのための下準備として、 $^2\text{D}_{3/2}$ F=2 準位をレーザー冷却サイクルから分離し、かつ分光前に $^2\text{S}_{1/2}$ F=0 準位へ初期化する。これらを確認したのち、時計レーザーを照射して単一 $^{171}\text{Yb}^+$ のスペクトルを観測した。振動サイドバンドを分離して観測するとこるまで達成した(図 6) [13]。

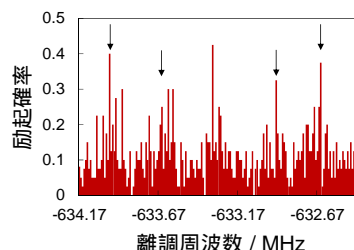


図 6 単一 $^{171}\text{Yb}^+$ 波長 435 nm $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ 遷移のスペクトル(はイオンの運動によるサイドバンド)

$^{171}\text{Yb}^+ \ ^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{F}_{7/2}$ 遷移

$^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{F}_{7/2}$ 遷移は自然幅が極端に狭いため、その励起には極めて狭い発振線幅とある程度のパワーのレーザーが必要である。東京理科大 G の結果を元に、波長 934 nm ECLD の線幅狭窄化を進めている。そして、このレーザーに、テーパ半導体素子を外部共振器構造でレーザー発振させた、出力 400 mW の光を位同期させ、高出力化を達成した[13]。ビームの空間モードの悪さに起因する、第 2 高調波発生の効率の悪さを改善すれば、遷移の励起確認に直ちに取り掛かることができる。

Ba⁺の利用

Ba⁺では冷却イオンの個数を増やすために、阪大 G の形状を元に設計したりニア型 RF トラップを導入した。 $^{174}\text{Yb}^+$ と同様に冷却技術を高め、単一 $^{138}\text{Ba}^+$ でラム - ディック領域閉じ込めを達成した。また、最大 16 個の $^{138}\text{Ba}^+$ をトラップ軸上に並べてほぼ静止させる結晶化を達成した[16]。

続いて、 $^{138}\text{Ba}^+$ 波長 1.76 μm $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移で光時計構築を目指した。Yb⁺ に用いている光共振器を使って波長 882 nm ECLD を線幅狭窄化し、これに波長 1.76 μm の ECLD を位同期させて時計レーザーを構築した。時計遷移の量子跳躍信号を観測した[13]。

電場に対して鈍感な $^{135,137}\text{Ba}^+$ の時計遷移 $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ は、波長が 2.05 μm と直接発振するレーザーが得にくい。そこで、波長 1.06 μm Nd:YAG レーザーとの差周波光で数 10 μW を発生させた。同様に差周波発生させた波長 1.76 μm 光を用いて、単一 $^{138}\text{Ba}^+$ で $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 時計遷移の励起を確認し、光時計構築には十分なパワーであることを確認した[16]。

$^{135,137}\text{Ba}^+$ のトラップについては、光イオン化

で利用する遷移の同位体シフトを利用して、天然同位体混合物から選択的にトラップできることを確認した。

(3) 光周波数比計測システムの構築

Ti:Sa レーザーベースのシステム

時計レーザーにスペクトル幅1オクターブの光コムを位相同期させ、もう1台の時計レーザーとのビート周波数を測定するシステムを構築した。位相同期に分周器を用いているため、位相同期は緩く完全ではない。しかし、ゲート時間の逆数以下にコムのゆらぎは安定化されていて、周波数比計測器として使用可能なレベルを達成した(図7)[13]。

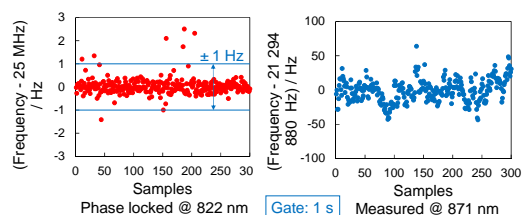


図7 光周波数比計測システムの結果。
(左) 時計レーザー1へのコムの位相同期、(右) 同時測定した時計レーザー2とのビート周波数

半導体レーザー励起 Yb:KYW レーザー

長時間連続運転を目指し、固体レーザーで Ti:Sa レーザーの技術が流用できる、Yb:KYW レーザーによる光コムの開発を進めた。実際には、過飽和吸収鏡を使わない Kerr レンズモード同期、スペクトル幅を拡大する非線形ファイバーの選定、コム全体の周波数の原点からのずれを示すオフセット周波数のビート検出とその狭窄化、という各段階で、Yb:KYW レーザー特有の問題に直面した。それぞれ解決方法を見出し、オフセット周波数の位相同期まで達成した(図8)。共振器の温度安定化を行い、1週間連続でモード同期発振を保てることを確認した[13]。

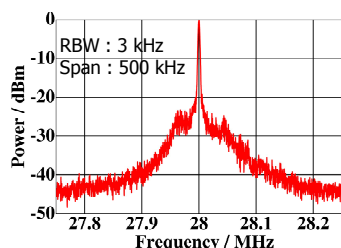


図8 モード同期 Yb:KYW レーザーを用いたスペクトル幅1オクターブの光周波数コム。周波数シンセサイザに位相同期させたオフセット周波数のビート。

(4) 得られた成果の位置づけ、今後の展望

計画研究全体として、グループ間で情報交

換と技術移転が順調に進み、重要な要素技術の開発をほぼ達成した。不確かさを測定して光時計として完成するまであと一歩のところまで到達していて、 の時間変化探索も近く開始できると考える。

単一イオン光時計は、多数個の中性原子を利用する光格子時計と比べて、周波数安定度が悪く長い測定時間を必要とする。しかし、イオンは中性原子よりも の変化に対する感度が高く、時間変化は遅い現象なので長い測定時間は不利にはならない。 の変化に対して感度が最も高い $Yb^+ \ ^2S_{1/2} - \ ^2F_{7/2}$ 遷移について、東京理科大 G で確立した 1 Hz 線幅レーザーの技術移転を早急に完了し、S-D 遷移で確立した技術を発展させて、光時計を構築したい。最終目標であった同じトラップでの Yb^+ の S-D、S-F 遷移の比較で、現在の上限値を超える比較を達成することを期する。

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30件)

[1] U. Tanaka, K. Suzuki, Y. Ibaraki, and S. Urabe, "Design of a surface electrode trap for parallel ion strings", Journal of Physics B, 査読有, Vol.47, No.3, 2014, 035301(1-7).
DOI:10.1088/0953-4075/47/3/035301

[2] S. Hirata, T. Akatsuka, Y. Ohtake, and A. Morinaga, "Sub-hertz-linewidth diode laser stabilized to an ultralow-drift high-finesse optical cavity", Applied Physics Express, 査読有, Vol.7, No.2, 2014, 022705(1-4).
DOI: 10.7567/APEX.7.022705

[3] Y. Imai, K. Sugiyama, T. Nishi, S. Higashitani, T. Momiyama, and M. Kitano, "Single-ion spectroscopy of the $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ clock transitions in Yb^+ towards search for temporal variation of the fine structure constant", Abstract of the 12th Asia Pacific Physics Conference 査読有, 2013, p. 246.
<http://www.jps.or.jp/APPC12Program/pdf/B3-PWe-21.pdf>

[4] T. Akatsuka, K. Tanihara, K. Komito, K. Ooi, and A. Morinaga "Dispersion-shaped ac Stark phase shift of Ca intercombination transitions with a time-domain atom interferometer", Physical Review A, 査読有, Vol.86, No.2, 2012, 023418(1-5).
DOI: 10.1103/PhysRevA.86.023418.

[5] T. Uehara, K. Sugiyama, and M. Kitano, "Frequency stabilization of laser diode to the 6S-8S two-photon transitions in cesium atoms in a vapor cell placed in an

external cavity”, Digest of 2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 査読有, 2012, pp.268-269. DOI: 10.1109/cpem.2012.6250905.

[6] U. Tanaka, K. Masuda, Y. Akimoto, K. Koda, Y. Ibaraki, and S. Urabe, “Micromotion compensation in a surface electrode trap by parametric excitation of trapped ions”, Applied Physics B, 査読有, Vol.107, No.4, 2012, pp.907-912. DOI: 10.1007/s00340-011-4762-2.

[7] Y. Onoda, K. Sugiyama and M. Kitano, “Selective detection of minor isotope lines in saturated absorption spectra by absorption filtering of major isotope lines”, Optical Review, 査読有, Vol.18, No.4, 2011, pp.365-366. DOI: 10.1007/s10043-011-0070-7

[8] Y. Onoda, K. Sugiyama, M. Ikeda, and M. Kitano, “Loading rate of Yb+ loaded through photoionization in radiofrequency ion trap”, Applied Physics B, 査読有, Vol.105, No.4, 2011, pp.729-740. DOI: 10.1007/s00340-011-4576-2

[9] T. Akatsuka, Y. Mori, N. Sone, Y. Ohtake, M. Machiya, and A. Morinaga, “Thermal calcium atom interferometer with a phase resolution of a few milliradians based on a narrow-linewidth diode laser”, Physical Review A, 査読有, Vol.84, No.2, 2011, 023633(1-6). DOI: 10.1103/PhysRevA.84.023633

[10] Y. Ibaraki, U. Tanaka, and S. Urabe “Detection of parametric resonance of trapped ions for micromotion compensation”, Applied Physics B, 査読有, Vol.105, No.2, 2011, pp.219-223. DOI: 10.1007/s00340-011-4463-x.

[11] K. Sugiyama, S. Kawajiri, N. Yabu, K. Matsumoto, and M. Kitano, “Sum-frequency mixing of radiation from two extended-cavity laser diodes using a doubly resonant external cavity for laser cooling of trapped ytterbium ions”, Applied Optics, 査読有, Vol.49, No.29, 2010, pp.5510-5516. DOI: 10.1364/AO.49.005510.

[12] U. Tanaka, R. Naka, F. Iwata, T. Ujimar, K. R. Brown, I. L. Chuang, and S. Urabe, “Design and characterization of a planer trap”, Journal of Physics B, 査読有, Vol.42, No.15, 2009, 154006(1-5). DOI: 10.1088/0953-4075/42/15/154006.

〔学会発表〕(計 111 件)

[13] K. Sugiyama, “Development of single ytterbium- and barium-ion optical clocks towards search for temporal variation of

the fine constant” (招待講演), 7th International Conference on Fundamental Physics Using Atoms, March 16, 2014, 日本科学未来館(東京都).

[14] U. Tanaka, K. Shimizu, K. Matsui, and S. Urabe, “Spectroscopy of single Ca+ confined in a planar trap”, 7th International Conference on Fundamental Physics Using Atoms, March 16, 2014, 日本科学未来館(東京都).

[15] 田中歌子, “量子インターフェースとしてのイオントラップの展望” (招待講演), FIRST-QIPP夏期研修会2012, August 10, 2012, 宮古島 (沖縄県).

[16] K. Sugiyama, “Progress in development of Yb+ and Ba+ optical clocks towards search for temporal variation of the fine constant” (招待講演), 5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms, October 9, 2011, Okayama University.

[17] 杉山和彦, “原子分子を使った基礎物理” (Discussion Leader), 第7回AMO討論会, June 6, 2010, つくば国際会議場, つくば (茨城県).

〔図書〕(計 2 件)

〔その他〕

[アウトリーチ] 杉山和彦, “単一イオン原子時計と基礎物理”, ポスター前で立ち話, 京都大学アカデミックデイ - みんなで対話する京都大学の日 - (2012.3.10).

[ホームページ] 新学術領域 原子切り開く 極限量子の世界, <http://xqw.hep.okayama-u.ac.jp/kakenhi/>

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

田中 歌子 (TANAKA, Utako)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・講師
研究者番号: 20359087

盛永 篤郎 (MORINAGA, Atsuo)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号: 90246687

(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

赤塚 友哉 (AKATSUKA, Tomoya)
理化学研究所・特別研究員
研究者番号: 90548257