

4-4 イオン量子系の極限計測と極限制御

早坂和弘 和久井健太郎 大坪 望 李 瑛 松原健祐 井戸哲也

量子ノード技術の実現には、量子系を測定し制御できる極限技術が必須とされている。イオントラップ中でレーザー冷却されたイオンについて実施した極限計測・極限制御に関する研究開発と、これらの研究の光周波数標準への応用について述べる。

1 まえがき

情報ネットワークの基幹回線を行きかう光信号に最適な量子制御を施せる量子ノード技術を実現するためには、光子や原子のような量子物理系を測定し、制御できる極限技術が欠かせないとされる。イオントラップ中でレーザー冷却により真空中に静止したイオン量子系は、レーザー光等を用いて個々の量子状態の計測・制御が可能であるのみならず、トラップ電場とクーロン場を介して系全体の量子状態を制御可能であるという顕著な特徴を持っている [1]。また、光共振器内の量子場と結合させることにより、光子とイオンとの間で量子状態の変換が可能であることも知られている [2]。これらの特色によりイオン量子系は量子ノードとしての応用のみならず、量子コンピューター [1]、量子シミュレーター [3]、光周波数標準 [4] の候補として広く研究が行われている。本稿では、NICT が取り組んできたカルシウムイオン ($^{40}\text{Ca}^+$) とインジウムイオン ($^{115}\text{In}^+$) の極限計測・極限制御に関する研究開発と、光周波数標準への応用について述べる。

イオントラップ中でレーザー冷却されたイオン量子系の特徴については文献 [1] が詳しいが、ここでは簡単にその概要を述べる。複数個イオンの蓄積に最も一般的に用いられるのは図 1 (a) に示す形状の線形イオントラップと呼ばれる装置である。超高真空中に設置された線形イオントラップを数 10 MHz の周波数、数 100 V の電圧の交流電場と直流電場で駆動することに

より、イオンを電極の中心部分に閉じ込めることができる。イオントラップ自身にイオンを冷却する機能はないため、レーザー冷却と呼ばれる方法でイオンを冷却する。イオンが静止すると、イオンから発生する蛍光光子を微弱光撮像装置 (Image-intensified CCD: ICCD) で撮影することにより直接観測することが可能である。図 1 (b) はレーザー冷却により一列に配置した Ca^+ の蛍光像である。この状態では、イオンが環境から隔離されたまま光の波長以下の領域に局在し、個別に量子状態の観測・制御が可能で状況が数日に及ぶ長時間にわたって継続して実現される。量子ノードをはじめとするイオン量子系の応用はこれらの特徴を利用する

2 ではイオン量子系の極限計測と極限制御の基本的なツールであるコヒーレント光源について実施した研究開発の概要を述べる。3 では、それ自身でのレーザー冷却が容易ではない In^+ の運動制御を行うための共同冷却法の研究開発について述べる。4 ではこれらの研究開発成果の応用として実施した In^+ 時計遷移周波数計測の概要について述べる。5 でまとめと今後の展望について述べる。

2 イオン量子系計測制御用コヒーレント光源

イオン量子系の計測と制御では、イオン生成、レーザー冷却、量子状態初期化、量子状態測定等の様々な操作に単一モードのコヒーレント光を用いる。イオンはイオン種固有の共鳴波長を持っており、その波長でのコヒーレント光を準備する必要がある。また、コヒーレント光の持つ線幅は、対象とする遷移の持つ線幅に対して十分狭い必要がある。図 2 に In^+ と Ca^+ の主な遷移波長と線幅を示す。 Ca^+ は半導体レーザーで直接発振可能な波長の遷移のみで構成されており、コヒーレント光源系を準備しやすいのに対し、 In^+ は紫外域に遷移を持つため、レーザーの波長変換等の手法で光源系を構成する必要がある。ここでは In^+ と Ca^+ のコ

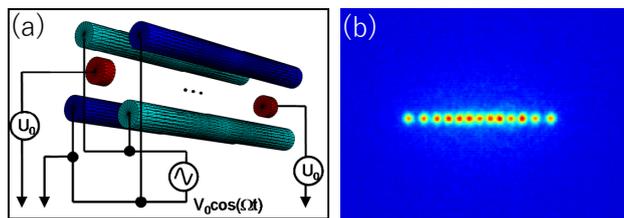


図 1 (a) 線形イオントラップと (b) その中でレーザー冷却されたカルシウムイオン

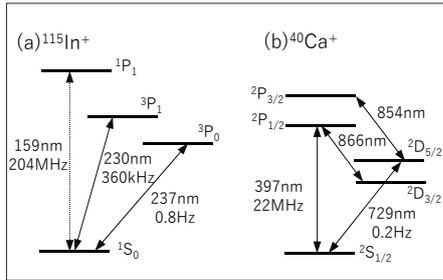


図2 (a) In⁺, (b) Ca⁺ の主なエネルギー準位、遷移波長と線幅

ヒールト光源系構築のために実施した研究開発の概要を述べる

2.1 光フィードバックによる発振スペクトルの狭窄化

本稿では、Ca⁺ について直接のレーザー冷却を適用し、この Ca⁺ を用いた共同冷却法により In⁺ を冷却する。そのために図2(b)に示される Ca⁺ の ²S_{1/2}-²P_{1/2} 遷移(波長 397 nm)を安定に励起するコヒーレント光源が必要となる。回折格子により発振スペクトルを制御する外部共振器型半導体レーザー (Extended-Cavity Diode Laser, ECDL) は通常 1 MHz 程度の線幅を持ち、最適条件でのレーザー冷却を適用するために発振スペクトルの狭窄化が望ましい。出力光のすべてを3枚のミラーからなる進行波型フィルター共振器に入力し、出力した光の一部を ECDL に光フィードバックする手法を考案し [5]、測定時間 1 秒での線幅を 7 kHz まで狭窄化できることを確認した [6]。また、ECDL では出力光に含まれている自然放出光の裾が図2(b)に示される Ca⁺ の ²P_{3/2} 準位を励起して準安定状態の ²D_{5/2} に誘導し、レーザー冷却を阻害する問題が知られているが、フィルター共振器を用いる方式では自然放出光の裾の強度が 30 dB 以上低減されることが確認された [5]。本稿でのイオン量子系実験ではフィルター共振器を用いる方式を用いたが、光ファイバー共振器を代わりに用いて平面光回路による集積化に適した新たな方式の動作実証も実施した [7]。

2.2 二段階波長変換による紫外光生成

In⁺ の量子状態観測、時計遷移の励起ではそれぞれ図2(a)の ¹S₀-³P₁ 遷移(波長 230 nm)、¹S₀-³P₀ 遷移(波長 237 nm)を用いる。これらの波長はレーザーの直接発振では生成できないため、それぞれ波長 922 nm、946 nm の半導体レーザーの二段階波長変換により生成した。このうち波長 230 nm 生成の構成を図3に示す。ブラッグ回折格子型半導体レーザー (DBRDL) の 922 nm 基本波(出力 150 mW)から、周期分極反転型 KTP 結晶 (PPKTP) で波長 461 nm の第二高調波を生

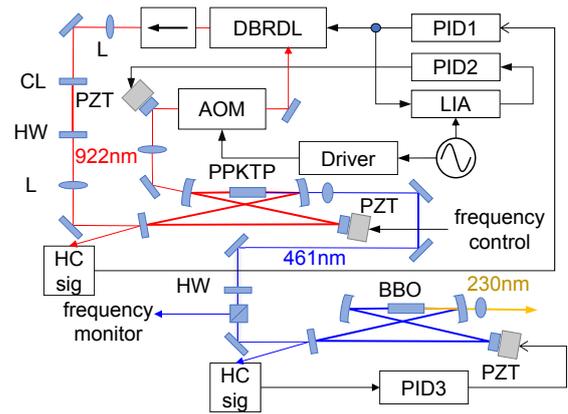


図3 230 nm コヒーレント光源の構成。DBRDL: ブラッグ回折格子型半導体レーザー、PID:PID 制御回路、LIA: ロックインアンプ、HC sig: Hänsch-Couillaud 信号検出器

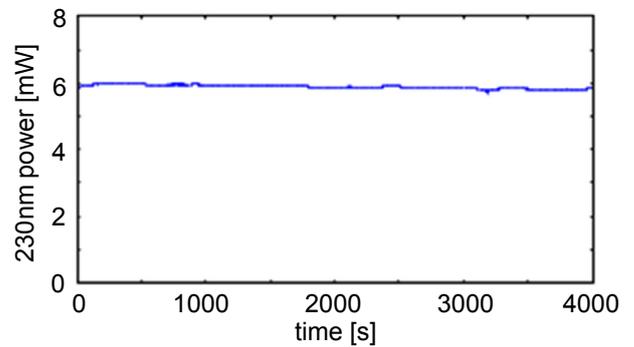


図4 生成した 230 nm コヒーレント光の時間変化

成し、次に BBO 結晶による第二高調波発生による波長 230 nm のコヒーレント光を生成した。図4に得られた 230 nm コヒーレント光強度の時間変化を示す。二段階の波長変換という比較的複雑な構成にもかかわらず、In⁺ の量子状態観測に必要な光強度が十分に長い時間得られている。後述する In⁺ 時計遷移周波数計測ではこの方式を基本とし、ブラッグ回折格子型半導体レーザーを ECDL とテーパー型光アンプによる構成への変更をし、PPKTP 結晶を導波路型 PPLN 結晶に簡便化する等、様々な改善を施した装置を用いた。

2.3 高次高調波による真空紫外光生成

最も一般的なイオンの量子状態測定ではイオンからの蛍光光子の有無により量子状態を識別する。In⁺ の量子状態が図2(a)の ¹S₀ か ³P₀ であることを識別するには ¹S₀-¹P₁ 遷移 (159 nm) を励起し、蛍光光子が観測されれば ¹S₀、観測されなければ ³P₀ であることをほぼ 100 % で確定することができる [4]。この波長域は真空紫外と呼ばれ、単一周波数モードでのコヒーレント光生成は極めて困難であり、これらのイオン種の量子状態測定には代替の手法が用いられている。In⁺ の場合には ¹S₀-³P₁ 遷移(波長 230 nm)が代替の遷移として用いられるが、この遷移からの蛍光強度は量子情報で

用いられる代表的なイオンである Ca^+ の $^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{P}_{1/2}$ 遷移 (波長 397 nm) の 1/60 程度であり、量子状態測定に時間を要するため、繰り返して量子状態計測を行う際の速度が制限される。 In^+ の $^1\text{S}_0$ - $^1\text{P}_1$ 遷移は波長が 159 nm の真空紫外域に位置するものの、遷移確率は $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_1$ 遷移の 570 倍であるため、何らかの方法で励起できれば高速な量子状態の観測が可能となる。 In^+ の量子状態を高速に観測する手段を実現するため、フェムト秒モード同期レーザーの高次高調波発生により真空紫外コヒーレント光を発生させる研究開発を実施した [8]。

モード同期レーザーでは、多数の周波数モードがコヒーレントに重ね合わせられて、極めて高い光電場強度が実現される。この高い光電場強度での非線形効果を利用することにより、高効率で高次高調波発生が行われる。本研究では図 5 に示す構成で、波長 795 nm のモード同期チタンサファイア (Ti:S) レーザーを、レーザー共振器と同一の光路長を持つ外部共振器に蓄積して更に光電場強度を増強し、ノズルから噴出させるキセノンガス (Xe) を非線形媒質として第 5 次高調波の 159 nm 光を生成した。生成した 159 nm 光は、フッ化物によるコーティングを施した特殊なアウトプットカップラーで共振器外に取り出した。図 6 に共

振器の外で蛍光板により可視化した真空紫外コヒーレント光の空間モードパターンを示す。ガウス型に極めて近い強度分布をしており、単一イオンに集光して照射できることが期待される。

共振器の外で測定した 159 nm 光の強度を図 7 に示す。横軸には共振器からの基本波漏れ光強度をとった。650 mW の Ti:S レーザーの入力に対して最大 $6.4 \mu\text{W}$ の 159 nm 光が得られ、出力光強度は基本波強度 5 乗の曲線によく合致しており、基本波が更に増強された際の出光の増強が予測できる。

得られた 159 nm 光は 1.9×10^5 程度の周波数モードで構成されているが、そのうち 2 個程度の周波数モードだけが In^+ の $^1\text{S}_0$ - $^1\text{P}_1$ 遷移に共鳴する。この共鳴する周波数モードを用いて単一 In^+ の量子状態計測を理想的な集光条件、観測条件で行った際に観測される波長 159 nm の蛍光光子数を見積もったところ、 $1 \mu\text{W}$ に対して毎秒 87 個の光子数が計算された。現状で生成可能な $6.4 \mu\text{W}$ では毎秒 550 個の光子数が予想され、代替の方法として用いられる $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_1$ 遷移での一般的な光子数毎秒 500 個に匹敵する値となっている。長期動作の安定化、強度の増強、イオントラップへの導入光学系の実装などにより、現在用いられている方式よりも高速な In^+ 量子状態測定が期待される。

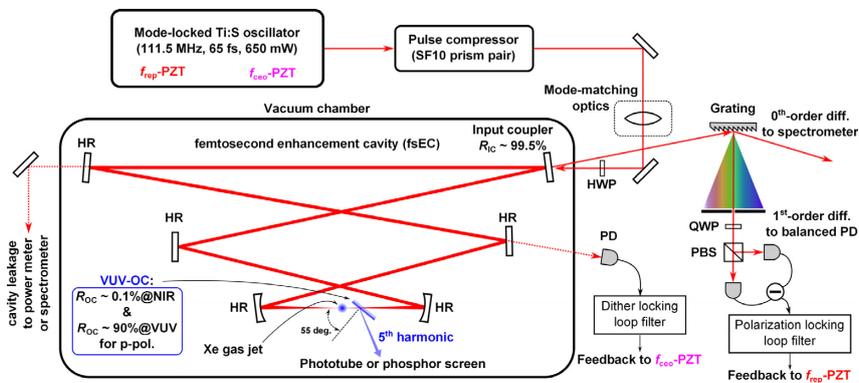


図 5 高次高調波発生による真空紫外光生成装置の構成

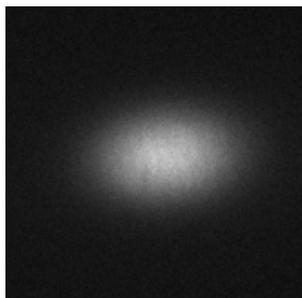


図 6 生成した真空紫外コヒーレント光の蛍光画像

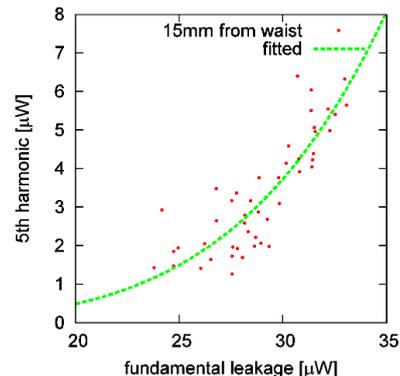


図 7 生成した 159nm 光強度

3 インジウムイオンの共同冷却

イオントラップは荷電粒子を安定に蓄積する装置であるが、それ自体は粒子を冷却する機能を持たない。イオンの量子状態の制御・計測を行うためには、何らかの冷却法によりイオンを静止させることが必要となる。最も広く用いられる方法はレーザー冷却であるが、適用可能なイオン種は限られる。本研究では、適切な光学遷移を持たないためにレーザー冷却が容易ではない In^+ の量子状態の制御・計測を行うため、レーザー冷却が容易な Ca^+ を用いた共同冷却の研究開発を実施した。

3.1 共同冷却によるインジウムイオンの観測

イオントラップに蓄積した複数個のイオンの運動は、トラップ電場とイオン間に働くクーロン力により集団振動モードで記述されるようになる。1個のイオンのみをレーザー冷却することにより、集団振動モード全体が冷却される。このようにして、単独ではレーザー冷却が容易ではないイオンを冷却する手法は、共同冷却と呼ばれる。線形イオントラップ中に Ca^+ と In^+ を蓄積し、 Ca^+ のレーザー冷却により In^+ を共同冷却する実験を行った。

図8(a)(b)(c)は2個の Ca^+ をレーザー冷却した後

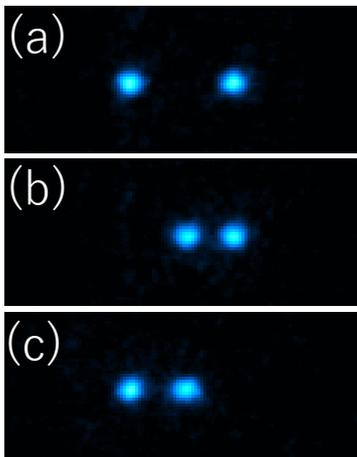


図8 2個の Ca^+ による1個の In^+ の共同冷却

に共鳴光イオン化により1個の In^+ を追加して生成したイオン配列を、 Ca^+ の共鳴蛍光を微弱光、撮像装置により観測して得た。イオンの配列が入れ替わる程度の弱い電圧でトラップを動作させて観測をすることにより、蛍光を発しない1個のイオンが存在することが識別できる。イオン列の集団振動モード周波数は個々のイオンの配列順序と質量により決定されるので、次に述べる振動モード周波数計測法により、蛍光を発しないイオンが質量数115の In^+ であることが特定できる。

3.2 二種イオンの配列制御

共同冷却法により直接レーザー冷却ができないイオンをイオントラップ中で静止させることが可能となった。イオンの量子状態・計測を行うためには、さらに目的のイオンを特定の場所に配置する必要がある。例えば光周波数標準への応用では、図8(a)の位置に In^+ を配置することが望ましい。そこで、集団振動モード周波数が個々のイオンの質量と配列順序により異なることを用いて、特定の配列を保持する制御法を開発した[9]。すべてのイオンが同位相で配列軸上を振動する周波数は配列(a)では ν_1 ($=100.5$ kHz)、配列(b)(c)では ν_2 ($=98.5$ kHz) と計算される。図9(1)から(4)には配列の時間発展を、縦軸は時間、横軸に軸方向の座標を取り、蛍光強度を疑似カラーとして表示した。トラップ電場を適切に調節することにより(1)の様に Ca^+ の自然放出による反跳で図8の配列(a)(b)(c)がランダムに変化する状況を実現することができる。この状態で配列(b)(c)の振動周波数である ν_2 をトラップ電極に印加すると、(2)に示すように集団的振動が励起されて配列(b)(c)が不安定となり、配列(a)に変化した瞬間に安定する。逆に、配列(a)の振動周波数である ν_1 を Ca^+ をレーザー冷却する波長397 nmのレーザーに強度変調として印加すると、(3)に示すように配列(b)(c)に変化した瞬間に安定する。配列(b)(c)が出現した際にのみ ν_2 で不安定化させて、定常的に配列(a)を保持したのが(4)である。このような選

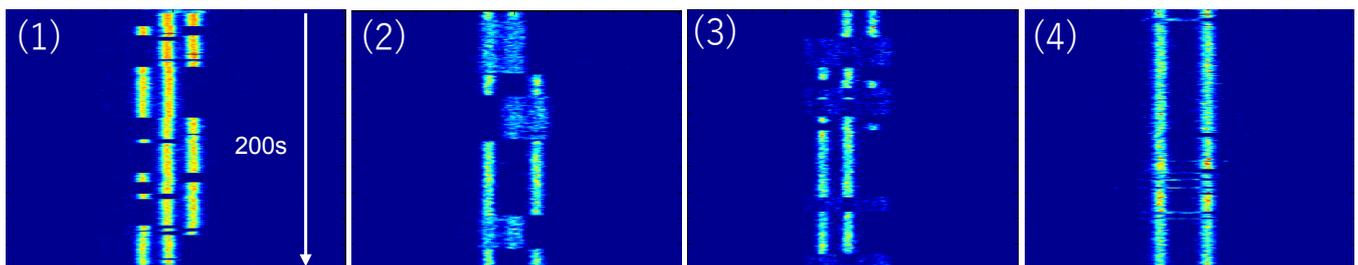


図9 イオン配列の制御

択的不安定化法により、 In^+ を中心に配置して量子状態の制御・計測を行うことが可能となった。この手法は大きなイオン数へも適応可能だと考えられる。

3.3 サイドバンド冷却

イオントラップ中でのイオンの運動を量子化すると、イオンの振動状態はフォノンと呼ばれる量子数で指定されるようになる。イオンの電子状態を操作するレーザー周波数を調整することにより、フォノンを1個ずつ取り除いて振動基底状態へ遷移させることができる。この手法はサイドバンド冷却と呼ばれている。1個の Ca^+ と1個の In^+ からなるイオン配列に対して、 Ca^+ の電子遷移を用いてサイドバンド冷却を適用する研究開発を大阪大学大学院基礎工学研究科との共同研究で実施した[10]。2個のイオンからなるイオン配列の振動モードのうち、イオンの配列軸方向で個々のイオンが逆位相で振動するモード(out-of-phase mode)にサイドバンドを適用したところ、フォノン数の平均値として0.096が得られた[10]。この値はイオン配列が振動基底状態まで冷却されたことを示しており、フォノンを介して In^+ の量子状態を読み出すための量子論理分光法が適用可能であること[11]、光周波数標準に応用した際に相対性理論の時間の遅れによる周波数シフト量を 10^{-17} 以下まで低減できることを意味する。

4 インジウムイオン時計遷移周波数計測

開発したイオン量子系の極限計測と極限制御を光周波数標準へ応用するための研究開発を時空標準研究室で実施した。光周波数標準では周波数安定化を施したレーザー周波数を、原子やイオンの狭線幅遷移(時計遷移)の中心周波数へとフィードバック制御することにより、普遍的な高精度光周波数を実現する。この光周波数は光周波数コムを用いて精度を保持したままマイクロ波領域に変換され、1秒の生成に用いられる。光周波数標準の主要な二方式の1つである単一イオン光周波数標準はH. Dehmeltにより1980年代に提案された。この方式では $^{27}\text{Al}^+$ と $^{171}\text{Yb}^+$ を用いた研究開発で 10^{-18} 台の不確かさが報告されている[4]。

In^+ はDehmeltが提案した単一イオン光周波数標準の候補の1つであり、最近の理論的研究によっても各種の周波数シフトが小さく、 10^{-18} 台の不確かさが予測されている[4]。また、提案された他のイオンでは量子状態測定が複雑な技術を要するのに対し、 In^+ では比較的容易な方法が適用可能である。これらの利点を組み合わせて、現在の主要な二方式の利点を統合した複数個イオン光周波数標準も提案されている[4]。しかしながら、 In^+ の時計周波数計測を報告した研究は

2件のみであり、その不確かさは 10^{-13} 台にとどまっている[12][13]。また報告された周波数値には約1 kHz以上の差があり、不確かさの誤差を考慮しても一致しない。より小さな不確かさでの測定で、遷移周波数を確定することを第1段階の目的として In^+ の時計周波数計測を実施した。

過去の研究例では In^+ 自身でレーザー冷却を行い、他の機関で校正された周波数標準を用いて時計遷移周波数計測を実施したのに対し、本測定では Ca^+ により共同冷却された In^+ に対して、NICT内で校正された2種類の周波数標準を基準として周波数計測を行った。 In^+ の量子状態測定は図2(a)に示す $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_1$ 遷移からの蛍光観測で行い、時計遷移励起のコヒーレント光(時計レーザー)の照射後、波長230 nmのコヒーレント光源で In^+ を観測し、蛍光光子が観測されれば時計遷移が励起されていない、観測されなければ時計遷移が励起されたとして励起確率を求めて時計遷移のスペクトルを取得した。 In^+ から観測される蛍光光子数は毎秒250個程度であった。図10はスペクトルの一例で、 In^+ の初期状態と時計レーザーの偏光方向を変えることで、時計遷移周波数 ν_0 に対して対称に分布する2つのスペクトルを取得している。1回の測定ではこれらのスペクトルの中心値 ν_+ 、 ν_- の平均値として周波数 ν_0 を決定した。スペクトル取得の際、遷移を励起する時計レーザーの周波数は、NICTで生成する協定世界時(UTC(NICT))、または光格子時計を基準として測定した。36回の測定で得た ν_0 の平均値として時計遷移周波数を求め、残留磁場などの物理的要因で生じる In^+ の系統的シフト、周波数基準からの周波数リンクで生じる系統的シフトを評価し、すべて考慮して得られた時計周波数は1 267 402 452 901 049.9 (6.9) Hzとなった。過去の報告での周波数値と

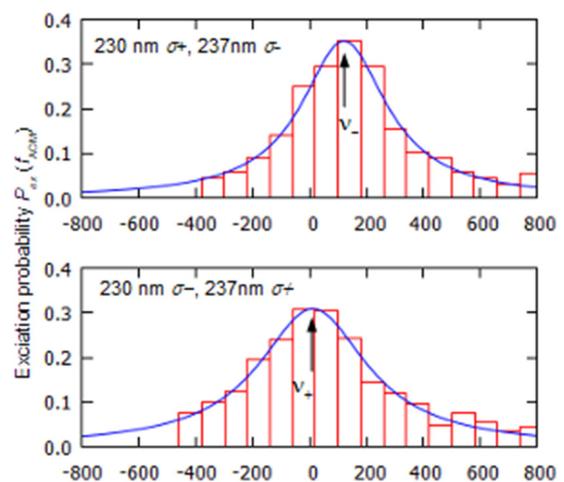


図10 In^+ 時計遷移のスペクトル

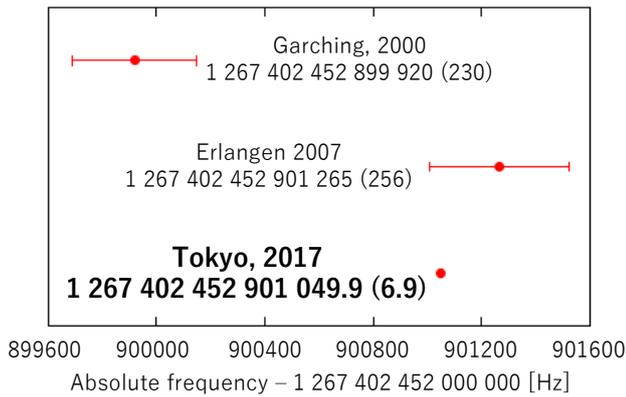


図 11 測定した In⁺ 時計遷移周波数と過去の報告例との比較

の比較を、文献 [12] の値を「Garching, 2000」、文献 [13] の値を「Erlangen, 2007」として図 11 に示す。今回の測定では、これまでに最も小さな不確かさの値 5.4×10^{-15} で、In⁺ の時計遷移周波数の測定が決定できた [14]。不確かさの最も大きな要因となっているのは残留磁場によるゼーマンシフトであり、磁気副準位の偏極や磁気シールド設置等の改善を施すことで、更に小さな不確かさでの光周波数標準としての動作が期待される。

5 まとめ

量子ノードの研究開発の一環として実施した、イオン量子系極限制御と極限計測の研究開発について述べた。イオン量子系を操作観測するコヒーレント光源系を構築し、In⁺ を Ca⁺ で共同冷却する技術を確認した。これらの技術を基盤として準備した In⁺ を時計遷移周波数計測に応用し、初めて 10^{-15} 台での測定に成功した。いくつかの改善を施したうえでサイドバンド冷却を適用すると、時間の遅れによる周波数シフトが 10^{-17} 台までに低減されることが期待できる。また、真空紫外光による In⁺ の量子状態測定が実現すると、光周波数標準動作時の安定度が大幅に向上することと期待される。

現在は単一イオンでの動作に限られる単一イオン光周波数標準は、共同冷却、複数イオン動作に適したイオントラップ及び今回使用した量子状態測定法を組み合わせることで、安定度の大幅な向上をもたらす「複数イオン光周波数標準」と呼ばれる新しい方式の実現につながると期待される [15]。また、サイドバンド冷却した In⁺ の時計遷移の量子状態を線形イオントラップのフォノンを介して Ca⁺ に転送すると、別のイオントラップ内で光周波数標準動作をする In⁺ との間に量子もつれ状態を形成することができる。この量子状態操作が実現すると、究極の原子時計の量子ネットワークの実現が期待される [16]。

謝辞

本研究を実施するにあたり、光格子時計を運用してデータを提供して下さった蜂須英和主任研究員、そして様々なご支援を頂いた石島博氏、水野道明氏、花土ゆう子上席研究員、武岡正裕センター長、佐々木雅英主管研究員に深く感謝する。

【参考文献】

- 1 D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. Wineland, "Quantum dynamics of single trapped ions," *Review of Modern Physics*, 75, 281, 2003.
- 2 M. Keller, B. Lange, K. Hayasaka, W. Lange, H. Walther, "Continuous generation of single photons with controlled waveform in an ion-trap cavity system," *Nature* 431, 1075, 2004.
- 3 R. Blatt, and C. F. Roos, "Quantum simulations with trapped ions," *Nature Physics* 8, pp.277-284, 2012.
- 4 A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, and P.O. Schmidt, "Optical atomic clocks," *Review of Modern Physics* 87, 637, 2015.
- 5 J. Labaziewicz, P. Richerme, K. Brown, I. L. Chuang, and K. Hayasaka, "Compact, filtered diode laser system for precision spectroscopy," *Optics Letters* 32, 572, 2007.
- 6 Kazuhiro Hayasaka, "Modulation-free optical locking of an external-cavity diode laser to a filter cavity," *Optics Letters* 36, 2188, 2011.
- 7 Y. Kawai, U. Tanaka, K. Hayasaka, and S. Urabe, "Mode-hop-free operation of a distributed Bragg reflector diode laser in an external fiber-cavity configuration," *Applied Physics B* 121, 213, 2015
- 8 K. Wakui, K. Hayasaka, and T. Ido, "Generation of vacuum ultraviolet radiation by intracavity high-harmonic generation toward state detection of single trapped ions," *Applied Physics B* 117, 957, 2014.
- 9 K. Hayasaka, "Synthesis of two-species ion chains for a new optical frequency standard with an indium ion," *Applied Physics B* 107, 965, 2012.
- 10 U. Tanaka, T. Kitanaka, K. Hayasaka, and S. Urabe, "Sideband cooling of a Ca⁺-In⁺ ion chain toward the quantum logic spectroscopy of In⁺," *Applied Physics B* 121, 147, 2015.
- 11 早坂 和弘, 「量子コンピューターと光周波数標準」、*日本物理学会誌* 69, 830, 2014.
- 12 J. von Zanthier, Th. Becker, M. Eichenseer, A. Yu. Nevsky, Ch. Schwedes, E. Peik, H. Walther, R. Holzwarth, J. Reichert, Th. Udem, T.W. Hänsch, P.V. Pokasov, M.N. Skvortsov, and S.N. Bagayev, "Absolute frequency measurement of the In⁺ clock transition with a mode-locked laser," *Optics. Letters* 25, 1729, 2000.
- 13 Y. H. Wang, R. Dumke, T. Liu, A. Stejskal, Y. N. Zhao, J. Zhang, Z. H. Lu, L. J. Wang, Th. Becker, and H. Walther, "Absolute frequency measurement of the ¹¹⁵In⁺ 5s² ¹S₀-5s5p ³P₀ narrowline transition," *Optics Communications* 273, 526, 2007.
- 14 N. Ohtsubo, Y. Li, K. Matsubara, T. Ido, and K. Hayasaka, "Frequency measurement of the clock transition of an indium ion sympathetically-cooled in a linear trap," *Optics Express*, 25, 11725, 2017.
- 15 K. Pyka, N. Herschbach, J. Keller, and Tanja E. Mehlstäubler, "A high-precision segmented Paul trap with minimized micromotion for an optical multiple-ion clock," *Applied Physics B* 114, 231, 2014.
- 16 P. Kómár, E. M. Kessler, M. Bishof, L. Jiang, A. S. Sørensen, J. Ye, and M. D. Lukin, "A quantum network of clocks," *Nature Physics* 10, 582, 2014.



早坂和弘 (はやさか かずひろ)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 先端開発センター
研究マネージャー
博士 (理学)
量子エレクトロニクス、量子光学、光周波数標準



和久井健太郎 (わくい けんたろう)

経営企画部
企画戦略室
プランニングマネージャー
博士(工学)
量子光学



大坪 望 (おおつぼ のぞみ)

電磁波研究所
時空標準研究室
研究員
博士(学術)
光周波数標準、量子エレクトロニクス



李 瑛 (り いん)

電磁波研究所
時空標準研究室
嘱託
博士(理学)
光周波数標準、レーザー物理



松原建祐 (まつばら けんすけ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(理学)
量子エレクトロニクス、周波数標準、標準時



井戸哲也 (いど てつや)

電磁波研究所
時空標準研究室
室長
博士(工学)
光周波数標準、超精密光計測、レーザー冷却