

量子コンピュータと光周波数標準

Keyword: 量子論理分光

1. はじめに

現在、国際単位系の時間基準（一秒）は、セシウム原子基底状態超微細構造間のマイクロ波遷移（約9.2 GHz）によって定義されている。近年、光周波数領域（ $10^{14}\sim 10^{15}$ Hz）の遷移を利用した原子時計の不確かさがセシウム原子時計のそれを凌駕するようになってきており、2019年以降に一秒の再定義が予定されている。光周波数標準の有力な候補として、冷却中性原子集団による光格子時計と、イオントラップ中の冷却イオンによる単一イオン光周波数標準が相補的な関係を保ちながら発展してきた。特に後者では、アメリカ国立標準技術研究所（NIST）のグループによって「量子論理分光」が開発され、アルミニウムイオン遷移周波数を 10^{-18} 台の不確かさで決定するにまで至っている。この貢献によりワインランド（David J. Wineland）が2012年のノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。本稿では量子論理分光の背景、概要とその応用について述べる。

2. 単一イオン光周波数標準

Al^+ 光周波数標準の基本となる単一イオン光周波数標準はデーメルト（Hans G. Dehmelt）により1982年に提案された。¹⁾ この提案では、イオントラップ中でレーザー冷却された単一イオンの吸収スペクトル中心にレーザー周波数をフィードバック制御して正確な光周波数を生成する。このレーザーは正確な一秒を生成するので時計レーザーと呼ばれる。静止した単一イオンの使用により、熱運動によるドップラーシフトの消失と長時間観測による狭スペクトル線幅が可能となる。また、周波数シフトが小さいアルカリ土類金属型電子配置イオン種（ Al^+ , In^+ 等）の使用により、18桁の周波数精度が予想された。同提案では、時計レーザーでイオンが長寿命準位に励起された確率を計測する方法として電子シェルビング法（electron shelving）と称される量子状態観測法が用いられる。デーメルトが想定するエネルギー準位構造を図1(a)に示す。 $|\downarrow\rangle_C - |\uparrow\rangle_C$ 遷移に共鳴する時計レーザー照射でイオンには重ね合わせ状態 $\alpha|\downarrow\rangle_C + \beta|\uparrow\rangle_C$ が生成され、 $|\beta|^2$ が最大となるようにレーザー周波数を制御する。短寿命の $|\downarrow\rangle_C - |aux\rangle$ 遷移に共鳴する検出レーザーの照射により、イオンは $|\downarrow\rangle_C$ か $|\uparrow\rangle_C$ に射影される。イオンが $|\downarrow\rangle_C$ に射影された場合、図1(b)のように検出レーザーにより蛍光光子が繰り返し発生する。イオンが $|\uparrow\rangle_C$ に射影された場合には、図1(c)のように蛍光光子は発生しない。この蛍光光子の有無により効率ほぼ100%で単一イオンが励起されたか否かという1ビットの

データを計測し、その統計から時計遷移スペクトルを計測する。この電子シェルビング法の特徴は、単一光子吸収を多数の蛍光光子発生の有無に変換するという一種の増幅効果にある。

3. 量子論理分光

電子シェルビング法は高効率量子状態観測法として、冷却イオン量子コンピュータ等の量子情報の研究でも広く用いられる。²⁾ しかしながら、これを適用できるのは、(1) 繰り返し蛍光光子発生を行う閉じた検出遷移を持つこと、(2) 検出遷移を励起するコヒーレント光が発生可能であること、という条件を満たすイオン種に限られる。デーメルトの提案後、単一イオン光周波数標準として実際に研究が行われたのはアルカリ金属型電子配置イオン種（ Be^+ , Mg^+ , Ca^+ 等）であった。これらの検出遷移用光源が直接のレーザー発振や波長変換により比較的簡単に準備できるのに対し、アルカリ土類金属型電子配置イオン種の検出遷移は真空紫外域（200 nm 以下）に存在しており、コヒーレント光の発生が技術的に困難である。 Al^+ の場合、超狭線幅（8 mHz）の時計遷移波長（267 nm）がレーザー高調波として発生可能であるものの、検出遷移が167 nmに存在するため電子シェルビング法を用いた光周波数標準は実現できなかった。

電子シェルビング法が適用不可能なイオン種に対して、電子シェルビング法が適用できる別のイオン種を同時にトラップして検出器として用いる分光法がワインランドらにより2002年に提案された。³⁾ 観測したいのは時計レーザーを照射した後のイオン（以下、「時計イオン」と呼ぶ）の量子状態 $\alpha|\downarrow\rangle_C + \beta|\uparrow\rangle_C$ である。この量子状態を図2に示す以下の手順で検出用イオン（以下、「論理イオン」と呼ぶ）の量子状態 $\alpha|\downarrow\rangle_L + \beta|\uparrow\rangle_L$ にコヒーレントに転写する。(1) 時計イオンと論理イオンをイオントラップにロードし、量子化された重心振動モード（周波数 ω_c ）をレーザー冷却により基底状態 $|0\rangle_m$ まで冷却する。(2) 時計イオンに時計レーザーを照射して量子状態 $\alpha|\downarrow\rangle_C + \beta|\uparrow\rangle_C$ を生成する。(3) 時計イオンに、遷移周波数（ ω_c ）より ω_c だけ低い周波数（ $\omega_c - \omega_c$ ）のレーザーパルス照射する。照射時間の調整により時計イオン量子状態を重心振動モードの量子状態 $\alpha|0\rangle_m + \beta|1\rangle_m$ に写すことができる。(4) 論理イオンに遷移周波数（ ω_L ）より ω_c だけ低い周波数（ $\omega_L - \omega_c$ ）のレーザーパルス照射すると、重心振動モードの量子状態が論理イオンの量子状態 $\alpha|\downarrow\rangle_L + \beta|\uparrow\rangle_L$ に写される。このようにして

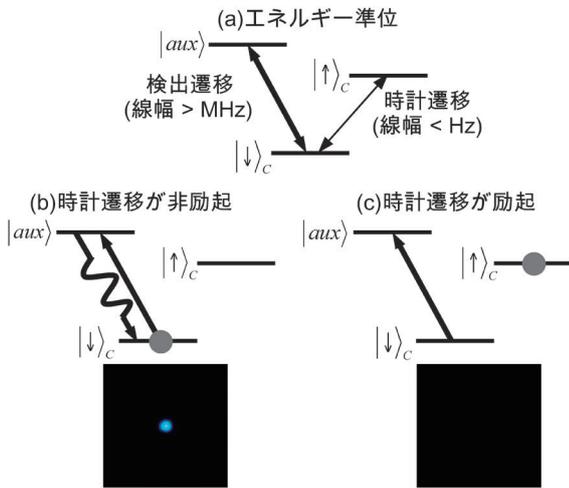


図1 デーメルトの電子シェルビング法によるイオン量子状態の観測。(a) エネルギー準位構造。(b) 時計遷移が非励起の際、検出遷移レーザーによりイオンは多数の蛍光光子を放出する。(c) 時計遷移が励起された際、イオンは蛍光光子を放出しない。写真は微弱光カメラにより撮影したカルシウムイオン。

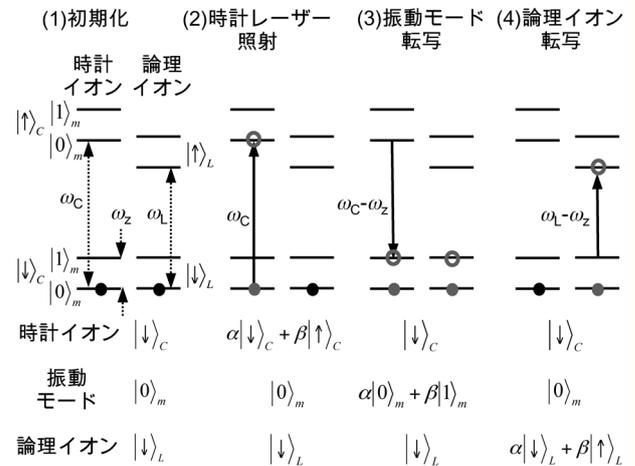


図2 量子論理分光法概要。イオンへの操作を上欄に、イオンの量子状態変化を下欄に示す (α を●、 β を○で示した)。詳細は本文を参照されたい。

論理イオンの量子状態へと写し取った時計イオンの量子状態に対して電子シェルビング法を適用することにより、時計イオンの吸収スペクトルが計測できる。

この分光法は2005年に Al^+ 、 Be^+ を用いて実証された。⁴⁾このとき、量子状態の転写過程がコヒーレントであることもラムゼイ分光法により実証している。ここで扱っている量子状態は二準位系の量子重ね合わせ状態、すなわち「量子ビット」である。複数イオンの量子ビット操作を、量子化されたイオンの重心振動モードを介して行う手法は、冷却イオン量子コンピュータの思想をそのまま分光法に応用したものであり、²⁾「量子論理分光 (Quantum Logic Spectroscopy; 以下 QLS と呼ぶ)」と呼ばれている。

4. 量子論理分光の応用

QLSの光周波数標準への実装は、 Al^+ を時計イオン、 Be^+ を論理イオンとして2008年に実現し、単一 Hg^+ 光周波数標準との比較で 2.3×10^{-17} の不確かさが報告された。⁵⁾ $^{27}\text{Al}^+$ に対して論理イオンを $^9\text{Be}^+$ から $^{25}\text{Mg}^+$ に変更し、質量差による冷却効率を改善した実験では 8.6×10^{-18} の確度が報告され、現在、最も正確な光周波数計測の報告となっている。⁶⁾ この不確かさは、イオン周辺の温度分布による黒体輻射電場によるACシュタルクシフトと不十分な冷却による二次ドップラーシフトにより制限されており、更なる改善が可能とされる。NIST以外の複数グループにより Al^+ 、 In^+ への実装が試みられている。

QLSにより実現する18桁の確度は精密計測のツールと

して期待される。実験室で動作する二台の Al^+ 光周波数標準の一台を33 cm上昇させると、一般相対性理論の予言する 4.1×10^{-17} の周波数増加が観測された。⁶⁾ 平均速度10 m/s以下で運動する Al^+ の特殊相対性理論による周波数減少も観測された。⁶⁾ 基礎物理定数時間変化の実験室での検証には、微細構造定数 α の変化に対して依存性が異なる原子種の遷移周波数の精密計測が有力とされている。 α 依存性の小さい Al^+ と大きい Hg^+ を用いた一年を超える17桁の周波数計測により $\dot{\alpha}/\alpha$ の予備的な計測が行われ、 α の時間変化が無いことを示唆する結果が得られている。⁵⁾

5. おわりに

原子集団を用いる光格子時計に対して、単一イオンを用いるイオン光周波数標準は確度に優れるとされてきた。 Al^+ はその象徴的な存在であったが、確度がそれを超える光格子時計が報告され始めている。新たな局面に入った一秒の再定義へ向けた研究開発競争の進展が非常に興味深い。

参考文献

- 1) H. Dehmelt: IEEE Trans. Instrum. Meas. **IM-31** (1982) 83.
- 2) J. I. Cirac and P. Zoller: Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 4091.
- 3) D. J. Wineland, et al.: in Proc. of the 6th Symp. on Frequency Standards and Metrology, ed. P. Gill (World Scientific, Singapore, 2002) pp. 361-368.
- 4) P. O. Schmidt, et al.: Science **309** (2005) 749.
- 5) T. Rosenband, et al.: Science **319** (2008) 1808.
- 6) C. W. Chou, et al.: Science **329** (2010) 1630.

早坂和弘 (情報通信研究機構)

(2013年11月20日原稿受付)