



研究ノート

捕獲イオンの小型レーザー冷却装置

占部伸二*

Development of a compact laser system for laser cooling of trapped ions

Key words : ion trap, laser cooling, Ca⁺ ions, ultraviolet laser diode

1. はじめに

イオントラップという装置の中に電場を用いて捕獲したイオンをレーザー光で冷却することによって、空間に孤立して静止しているようなイオンを発生させることが可能になってきた。イオントラップを用いると一個のイオンでも非常に長い時間、微小な空間領域に閉じ込めておくことができる。このようなイオンを用いて、新しい方式の周波数標準の開発に向けた研究が精力的に進められており、高精度な新しい周波数標準の実現の可能性が高まっている。また量子光学分野においても各種の新しい極限的な研究が現在進められるようになってきた。

レーザー冷却では周波数の安定な単一モードのレーザー光を原子の吸収線の低周波側に同調させて原子に照射する。ドップラー効果によって光の方向に向う原子のみを選択的に励起して光の放射圧によって原子の運動エネルギーを奪うことができる(ドップラー冷却)。この方法によってイオンの温度を1mK程度まで冷却することができる。イオンを小さなトラップ内で冷却すると光の波長以下の微小な空間に閉じ込めることができる。この微小領域に局在するイオンに対しては光領域においても分光スペクトル幅を制限するドップラー効果を除くことが可能である。イオンの持つ寿命の長い準安定状態と基底状態間の光遷移を観測すると非常に狭い光吸収スペクト

ルを得ることができる。究極的にはスペクトルのQ値として 10^{15} という非常に狭いスペクトルが得られる。一個のイオンの光スペクトルをレーザーの周波数絶対安定化の参照信号として用いると非常に高精度の周波数標準が実現できる。また、一列に並んだイオンを零点振動付近まで冷却すると量子計算などに用いることができる^[1]。

2. 小型レーザー冷却装置の開発

我々は微小なイオントラップの中にrf電場を用いてイオンを捕獲してレーザー冷却により光の波長以下の空間領域に閉じ込める実験を進めている。この実験のためにイオントラップ装置及びレーザー冷却に必要なレーザー光源システムの開発を行った。これまではイオントラップを用いたレーザー冷却の実験にはリング型の色素レーザーを何台も並べるなどのがかりなレーザー光源システムを準備することが必要であった。しかしながら最近の半導体レーザーや非線形結晶を用いた波長変換技術の進歩により、小型の半導体レーザーのみでレーザー冷却を行うことが可能になってきた。半導体レーザーは他の波長可変レーザーに比べ信頼性、操作性、低コストなどといった面から広い分野で用いられているが、レーザー冷却用の光源としても魅力的である。半導体レーザーのみで実験が可能な代表的なイオンとしてはCaイオンがある。我々はこのCaイオンに着目し、半導体レーザーのみを用いた小型のレーザー装置の開発を行った。

Caイオンのレーザー冷却及び高分解能光スペクトル測定を行うには波長が397nm, 866nm, 729nmの3つの光が必要である。これらの波長の光はすべて半導体レーザーの基本波のみで発生することができる。397nm光の発生のために最近になって登場した紫外(紫色)半導体レーザーを用いた光源の開発を行った。レーザー冷却を行うには単一モードで波長



* Shinji URABE
1950年1月生
1975年東京大学大学院・工学系研究科
修士課程修了
現在、大阪大学・大学院基礎工学研究
科・物理系専攻・電子光科学分野、
教授、工学博士、量子エレクトロニクス
TEL 06-6850-6325
FAX 06-6850-6325
E-Mail urabe@ee.es.osaka-u.ac.jp

可変な連続波レーザーが必要であり、周波数の安定性も要求される。紫外半導体レーザーは、外部共振器型にすることによって単一モード化及びスペクトルの狭窄化を行った。また、参照共振器を用いた周波数安定化によって長期的なドリフトも抑制した。397nm光として半導体レーザーの基本波を用いた場合にはこれまで波長変換光を用いた実験では観測されなかった予想外の現象が観測された。半導体レーザーに含まれるスペクトル幅の広い自然放出光がレーザー冷却に非常に悪い影響を及ぼすことが判明した。このため、自然放出光成分を回折格子で取り除くなどの対策を行った^[2]。866nm光についても同様に半



図1 小型レーザー冷却装置。奥の右手に見えるのが729nm光のLD、左手が絶対周波数安定化を施した780nm光のLD。手前左手が397nm光のLD、右手が866nm光のLD。右下に見えるのが真空チャンバー(イオントラップ装置)。

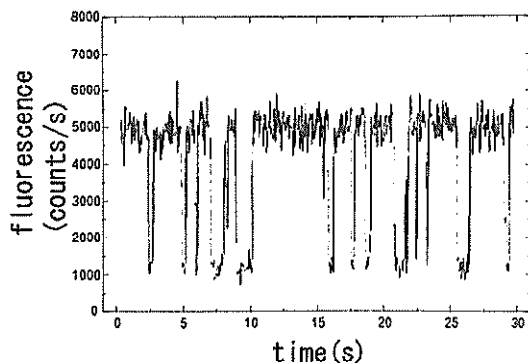


図2 一個の冷却イオンによる量子跳躍信号

導体レーザーを外部共振器型に改造し参照共振器を用いて周波数安定化を行った。高分解能光スペクトル観測用の729nm光は-50℃まで冷却した半導体レーザーにより発生させた。このレーザーは光フィードバック法によってスペクトルを狭窄するとともに、周波数絶対安定化を施した光共振器を用いて周波数のドリフトを除いた。共振器の周波数絶対安定化にはRb原子の吸収線に周波数を安定化した半導体レーザーを用いた。

このように半導体レーザーのみでレーザー光源を構成することにより、レーザー光源システムとイオントラップの入った小型の真空チャンバーがすべて3m×1.2mの光学定盤に配置された小型の実験システムを完成させた。図1はこの小型のレーザー冷却実験装置の概観を示している。図2はこの装置を用いて一個のCaイオンをレーザー冷却して量子跳躍信号を観測した結果を示したものである。縦軸はイオンからの397nmの蛍光、横軸は時間である。蛍光信号がところどころ消失しているのは729nmのレーザー光を照射することで量子跳躍によってイオンが光を発しない準安定状態に遷移したことを示しており、この準位の寿命に相当する時間が過ぎると基底状態に戻って蛍光を発する様子を示している。さらに、レーザー光の周波数を掃引して量子跳躍の頻度を計測することによって準安定状態への狭い光吸収スペクトルの観測を行い、イオンが5mK以下まで冷却されて光の波長以下の領域に閉じ込められていることを確認している。

3. 今後の展開

現在、イオン運動の零点振動状態の発生に向けて実験を進めている。数10μK程度まで冷却すると90%以上の時間において零点振動状態が実現すると予想されるが、上に述べたドップラー冷却に加えてサイドバンド冷却という別の冷却法が必要であり、そのための準備と装置の改良などを進めている。零点振動状態が実現するとイオン運動の量子状態をレーザー光によって制御することが可能になる。729nm光の周波数を制御してイオンに照射するとイオン運動の量子状態と内部の量子状態(電子状態)のもつれ合った状態、エンタングルド状態を発生させることもできる。このような量子状態を用いると量子計算などの実験が可能になる。

一個の冷却イオンを用いた光領域の周波数標準は

ノーベル物理学賞受賞者のH. Dehmeltによって1980年代初めに提案され、 10^{-18} の周波数精度の可能性があると指摘された。当時の技術から考えると実現には大きな困難が伴うと予想されたが、この20年間の各種技術の進展によって大きく研究が進歩している。とりわけここ数年の間に光周波数の絶対測定法に大きなブレークスルーがあった。フェムト秒モード同期レーザーと非線形ファイバーの組み合わせにより光領域において超広帯域のコムを発生することが可能になった。このため遠赤外から可視域まで何台もの周波数安定化レーザーが必要な周波数チェーンによる測定法に比べて、小型の装置を用いて簡便に高精度で光周波数の絶対測定が可能になった。物理量の標準として約15桁という最高の精度を持つ周波数(時間)標準が新たな方式の開発により三

桁上がる可能性も議論されている。現在、先進諸国において研究が活発化しているが、わが国でも公的研究機関において冷却イオンを用いた光周波数標準の開発が計画され準備が進められている。我々もこれまでの研究の蓄積をもとに研究開発に寄与していきたいと考えている。

参 考 文 献

- [1] 占部伸二, イオンのレーザー冷却とその応用, 現代物理最前線 3, 大槻義彦編, 共立出版, 2000.
- [2] K. Toyoda, A. Miura, K. Hayasaka, M. Watanabe, S. Urabe; Opt. Lett., Vol. 26, pp. 1897-1899, 2001.

