

トランスファー共振器を用いた Ca^+ 冷却用レーザーの周波数安定化

先進理工学専攻 向山研究室 藤永宗和

1 研究背景

1.1 冷却イオン

1923年にE.H.Kingdonによって行われたキングドントラップによって初めて荷電粒子の捕獲に成功した [3]。また、1936年にF.M.Penningによって静電場と静磁場によってイオンを捕獲するペニングトラップが開発された [4]。また、1953年にV.W.Paulによって本研究でも用いているポルトラップが開発された [5,6]。さらに1960年にMaimanによってレーザーが開発され [1]、さらに単色性の良い波長可変型のレーザーの開発が進んだことにより、1970年代にレーザーの輻射圧を用いた原子・イオンの冷却の可能性が議論された。その後、レーザー冷却技術 [2] の確立により、冷却原子・イオン分野の実験が大幅に進歩した。1980年にはW.Neuhauserらがポルトラップによって捕獲された Ba^+ をレーザー冷却することで、初めて単一イオンのトラップに成功した [7]。イオントラップを用いた実験では、量子力学的な現象の観測 [8]、原子時計 [9]、量子情報処理 [10] などが現在も盛んに研究されている。

1.2 イオンの種類と冷却レーザー技術

図1に数種類のレーザー冷却の対象となるイオンとレーザー冷却を行うために使われる遷移幅の波長を示した。2つの波長が示されているイオンは、基底状態と第一励起状態の間に準安定状態があるイオンである。レーザー冷却を閉じたサイクルとするための再励起用レーザーの波長を2番目に示してある。基底状態がさらに超微細構造を持つ場合はさらに複数の冷却用レーザーが必要になる。レーザー冷却には単一モード波長可変な連続波のレーザーが必要である。トラップされたイオンの冷却の場合には狭い空間に局在するイオンが対象となるため、特別に数多くのイオンを対象とするのでない限り、レーザーのパワーは $500\mu\text{W}\sim 1\text{mW}$ あれば十分である。レー

ザー光をレンズを用いて集光してイオンに照射することによって、容易に飽和強度以上にすることが出来る。一方、レーザーのスペクトル幅や周波数ドリフトについてはかなりの性能が要求される。電気四重極子遷移を用いる弱い束縛条件の場合には、対象とする遷移の自然幅が数十 MHz (Ca^+ の場合、20MHz) 程度であるので、線幅 1MHz 以下、また周波数ドリフトとしては数十 MHz/時間程度の性能のレーザーで冷却出来る。

イオンの種類	レーザー冷却用波長(nm)	電気四重極子遷移(nm)
Be^+	313	
Mg^+	280	
Ca^+	397 866	729
Sr^+	422 1092	674
Ba^+	493 650	1760

図1 各種イオンのレーザー冷却の波長

2 目的

本研究室では極低温 Li 原子と Ca^+ の混合系を実現してそれら2つの弾性衝突レートや非弾性衝突レート（電荷交換衝突、イオン分子生成など）の観測実験を行っている [11]。その中で現在、 Ca^+ 冷却光周波数の長期安定度が悪く、レーザー冷却の効率が低下する問題がある。そのために Ca^+ を長時間イオントラップ中に保持できず、実験に支障をきたしている。本研究ではその問題解決のために、トランスファー共振器を用いて Ca^+ 冷却光の長期周波数安定化を行った。

3 レーザー冷却

ここでは簡単のため2準位原子かつ1次元方向運動のみを考えることにする。レーザー（光子）と原子が衝突した場合、原子はレーザー光の進行方向に1光子の運動量（輻射圧）を受け取ることになる。

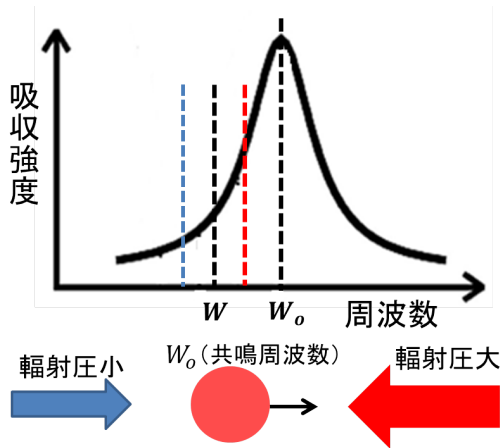


図2 ドップラー冷却概要図

ここで速度ゼロの原子に周波数 ω の光が左右から入射された場合を考える（図2）。この場合、原子は左右からの光を全く同じに感じて、同じ大きさの輻射圧を受けることになる。そのために左右からの輻射圧は打ち消しあい、原子は力を感じないことになる。次に原子が右方向に運動している場合を考える（図2）。ここでドップラー効果を考慮にいれて、レーザーの周波数 ω を原子の共鳴周波数 ω_0 より少し低く調整しておく ($\omega < \omega_0$)。このようにレーザーを用意すると、ドップラー効果より原子は進行方向と対向するレーザー（図2の右側）の周波数 ω を実際より高く感じる（図2の赤の点線）。逆に原子進行方向と同じ方向のレーザーの周波数は実際より低く感じる（図2の水色の点線）。つまり、原子の進行方向と同じ方向のレーザーの輻射圧より、進行方向に対向するレーザーの輻射圧の方が大きくなる。そのため、進行方向のエネルギーが減少して原子の運動速度が遅くなる（温度が下がる）。これがドップラー冷却である。

4 トランスファー共振器を用いた周波数安定化

4.1 周波数安定化の実験系構築

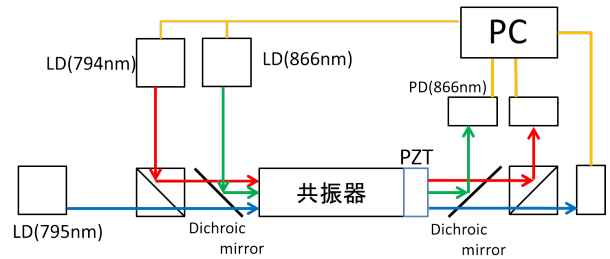


図3 実験系概要図

図3にトランスファー共振器を用いた実験系を示す。まず、Rbの共鳴線に周波数安定化したLD(795nm：周波数基準)と安定化したいLD(794nm),LD(866nm)のレーザー、光共振器、PD（フォトダイオード）を用意して、図3のようにPolarization Beam Splitter (PBS)とDichroic mirror(製品名：DMSP805)を用いて実験系を構築した。LD(795nm)は青色線、LD(794nm)は赤色線、LD(866nm)は緑色線でそれぞれレーザー光を表している。また、PDとPC、LDを繋いでいる黄色線は電気信号を表している。さらに、共振器についているPZTに三角波(5.5V 2.5Hz)の電圧を印加して共振器長を変化させることで共鳴スペクトルを観測している。

4.2 LDへのフィードバック方法

図4にPCで読み取った透過光スペクトルを示す。まず、LabviewプログラムでLD(795nm)、LD(794nm)、LD(866nm)のそれぞれの共鳴周波数スペクトルのPD Signalの最大値になる時間軸上での位置（ここではピーク位置と呼ぶことにする）を検出する。図4で青色、赤色、緑色点線は、それぞれLD(795nm)、LD(794nm)、LD(866nm)のピーク位置を示している。

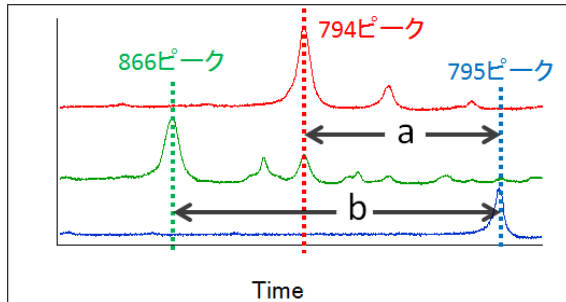


図4 トランスファー共振器の透過光信号

LD(795nm) は Rb 原子の吸収線に周波数安定化されているので、ピーク位置がゆらぐことはない。この LD(795nm) の透過スペクトルを周波数基準にする。ここで LD(795nm) と LD(794nm) のピーク位置の差を a、LD(795nm) と LD(866nm) のピーク位置の差を b と定義する。今回の周波数安定化では、このピーク位置の差 a、b が常に一定になるようなフィードバック信号を LD(794nm)、LD(866nm) それぞれの旧共振器の PZT に送ることによって周波数を安定化させる。ここで旧共振器とは、トランスファー共振器とは別に用意されている周波数安定化基準の共振器 (共振器長 7.5cm、1FSR は 1GHz) である。また、図 4 を見ると、それぞれの共鳴周波数のスペクトル付近に小さなスペクトルが生じている。これは作成した共振器への光のカップリングが悪いことが原因だと考えられる。しかし、トランスファー Labview プログラムではこの図 4 の共鳴周波数スペクトルの PD Signal の最大値になる時間軸上での位置を観測し続ければよい。従って、周りに小さなスペクトルが存在してもフィードバックには悪影響は与えないと考えて、出来る限り共鳴周波数スペクトルの周りのスペクトルが小さくなるように調整して実験を行った。三角波の掃引長さは FSR 約 2 個分、信号取得サンプルレートは 100KHz、サンプリング数は 10K であった。また、PD から PC へ信号を取り込むためのアナログ入力ボードには National Instruments 社の NI9215、PC から LD にフィードバック信号を送るアナログ出力ボードに NI9263、共振器への掃引信号をトリガー用として取り込むためのボードに NI9205 を用いた。

4.3 イオントラップを用いた周波数安定度の評価

今回、トランスファー共振器を用いた周波数安定度の評価をイオントラップの蛍光量変化 (イオン数 5 個) を用いて行う。まずレーザーの周波数を手動で調整 (397nm 冷却光は周波数掃引) しながら、イオントラップを用いて 5 個の Ca^+ を捕獲する。その後、冷却光の掃引をゼロにして手動で 397nm (冷却光)、866nm (Repump 光) の周波数を変化させながら、PMT 信号 (イオンの蛍光量) が最大の 1/2 程度になるように周波数を調整する。その状態で PMT 信号 (イオンの蛍光量) を観測する。

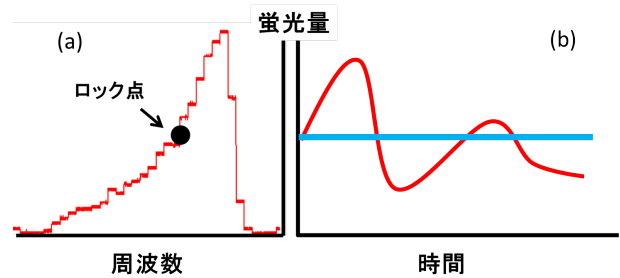


図5 周波数安定度評価の概念図

図 5 は周波数安定度評価の概念図を表している。図 5(a) は、横軸は 397nm (冷却光) の周波数、縦軸は PMT 信号 (イオンの蛍光量) で、イオン化スペクトルを表している。図 5(b) は、横軸時間は時間、縦軸は PMT 信号 (イオンの蛍光量) で、イオン蛍光量の時間変化を表している。

ここで図 5 のようにイオン化スペクトルの蛍光量最大の 1/2 程度になる周波数をロック点 (黒丸) に選んだとする。仮に、周波数が長期的に安定していたら図 5 青線のように最初にセットした蛍光量から時間的に変化がない結果が得られると予想される。また、仮に周波数にゆらぎが生じていたとすると周波数の値によって蛍光量が違うので図 5 赤線のように蛍光もゆらぎを持つことになる。

5 結果

5.1 旧共振器のみを使用した蛍光測定

図6~9に旧共振器によるロックで周波数安定化を行ったレーザーを用いた場合のイオン蛍光の結果を示す。オシロスコープの関係で1回の最大観測時間は1000秒であるので、何度も測定を繰り返して再現性を観測した。今回はそのうちの4つのみ示した。

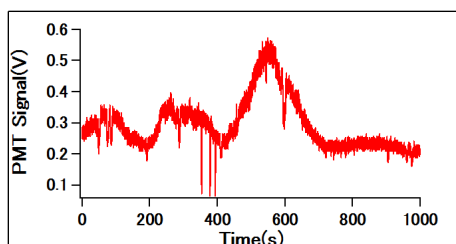


図6 旧共振器のみを使用した蛍光測定結果 (a)

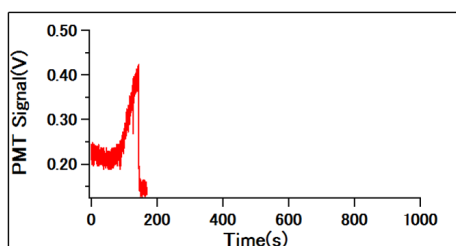


図7 旧共振器のみを使用した蛍光測定結果 (b)

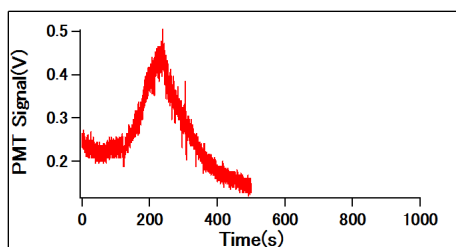


図8 旧共振器のみを使用した蛍光測定結果 (c)

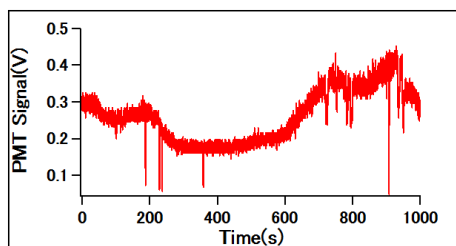


図9 旧共振器のみを使用した蛍光測定結果 (d)

図6~9の全体を通して、イオン蛍光（レーザーの周波数）が時間的に大きくドリフトしている様子が分かる。また、一瞬だけ蛍光が下がっている現象も多く見受けられる。例として (a) の300~400秒付近、(d) の200~300秒などである。これはLD(794nm : 冷却光)の旧共振器への周波数ロックが一瞬はずれたが Re lock システム [12] によって周波数ロックがかかりなおったためこのような波形がみえたと思われる。図6のケースでは、イオン蛍光（レーザーの周波数）が上下に激しくドリフトしている。また、図7のように周波数がイオンを加熱する方向にドリフトして途中でイオンがトラップからいなくなる場合もあった。図8のケースではレーザー周波数がイオンを加熱する方向にドリフトした後、反対方向に大きくドリフトした結果が得られた。この場合も、イオンの発する蛍光が減少するので実験に支障が生じる。図9でも周波数が短期間なら安定している場合もあるが、全体を通してみるとドリフトしている様子が観測された。このように旧共振器のみの周波数安定化ではイオンを使用した実験が出来ないことがわかった。

5.2 トランスファー共振器を使用した蛍光測定 [周波数基準 : LD(795nm)]

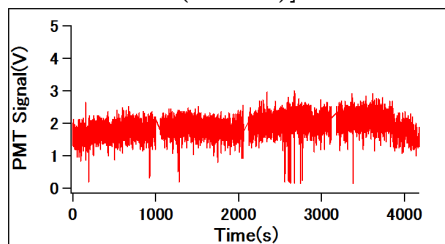


図10 トランスファー共振器を使用した蛍光測定結果 (a)

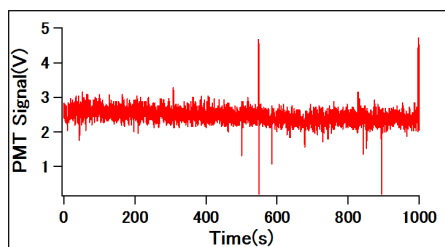


図11 トランスファー共振器を使用した蛍光測定結果 (b)

図 10、11 はそれぞれトランスファー共振器を用いた周波数安定化を行った状態で、4000 秒、1000 秒のスケールで周波数ドリフトを測定した結果である。この測定は周波数基準に Rb の共鳴線に周波数を安定化させた LD (795nm) を使用した。図 (a)、(b) についてトランスファー共振器を用いた周波数安定化を行っていない場合 (旧共振器のみに周波数安定化) と比較して蛍光量のゆらぎが非常に小さいことが分かる。しかし、図 10 で 4000 秒という長い時間でみると非常にゆっくりであるが中心周波数がドリフトしているのが分かる。これは周波数基準となる LD (795nm) の周波数ロックに用いているエラー信号のゼロ点のオフセットが時間的に揺らいでいることや、共振器の温度変化による共振器長の変化の影響などが挙げられる。

5.3 トランスファー共振器を使用した蛍光測定 [周波数基準 : He-Ne レーザー (633nm)]

図 12、13、14 はそれぞれ周波数基準に He-Ne レーザー (633nm) を用いて周波数安定化を行った結果である。

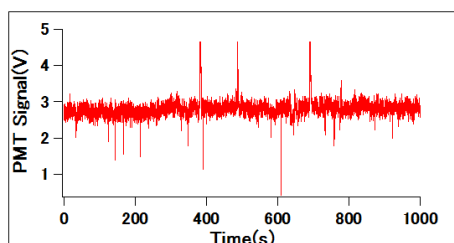


図 12 トランスファー共振器を使用した蛍光測定結果 (a)

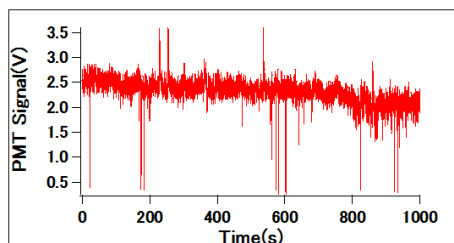


図 13 トランスファー共振器を使用した蛍光測定結果 (b)

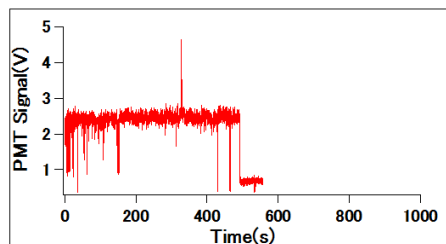


図 14 トランスファー共振器を使用した蛍光測定結果 (c)

周波数基準に 795nm を使用した場合と比較して大きな差は生じなかった。しかし得られたデータを解析してみると、1000 秒での蛍光の傾きは平均して 0.155mV/s(795nm)、0.36mV/s(633nm) となった。これより、多少 795nm を使用した方が良いといえる。この差が生じた理由として、633nm はスペックシートより 8 時間で 2MHz 周波数がドリフトすること、共振器の温調精度などが挙げられる。

6 まとめ&今後の展望

本実験は Ca^+ と長時間捕獲するための冷却光、Repump 光の長期周波数安定化を目的として、トランスファー共振器を用いた周波数安定化を行った。また、その評価をイオンの蛍光を用いて行った。結果として旧共振器だけに周波数安定化している場合と比較するとトランスファー共振器を用いた周波数安定化した場合ははるかに周波数ドリフトを抑えることができた。しかし、まだ改善の余地はあると考えている。主な改善点としては、

(1)LD (795nm) を Rb 原子吸収線への周波数安定化の精度向上

- ・ロック回路の時定数の見直しなど

(2)Labview のプログラムの改善

- ・フィードバック時定数を自由にかえられる機構を作成する

(3)トランスファー共振器へのカップリングの改善

- ・レンズ選択、パスのアライメント

4000 秒の長い時間スケールみると中心周波数はゆっくりとドリフトしている。それは Rb 吸収線に周波数安定化するためのエラー信号のオフセットのゆらぎや Labview プログラムが原因であると考えている。そのために (1)(2) の改善点を挙げた。また

(2) の改善は蛍光量の振幅小さくする、つまりレーザー周波数の短期的・中期的な安定度の改善にもつながると考えている。また、たまに Labview のプログラムが誤作動をを越すことがある。これは、トランスファー共振器に対するレーザーのカップリングが悪く、共鳴周波数での透過スペクトルのサイドに小さなスペクトルが立っているのが原因でないかと考えている。この問題を改善するために (3) の改善点を挙げた。

参考文献

- [1] T.H.Maiman ,Stimulated Optical Radiation in Ruby *Nature* **187**, 493-494 (1960)
- [2] Steven Chu, L. Hollberg, J. E. Bjorkholm, Alex Cable, and A. Ashkin,Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure *Phys.Rev.Lett* **55**,48 (1985).
- [3] K. H. Kingdon:A Method for the Neutralization of Electron Space Charge by Positive Ionization at Very Low Gas Pressures *Phys.Rev.* **21**,408 (1923).
- [4] F,M, PENNING :THE GLOW DISCHARGE AT LOW PRESSURE BETWEEN COAXIAL CYLINDERS IN AN AXIAL MAGNETIC FIELD *PHYSICA III* **3** , 873 (1936).
- [5] Paul, W. Steinwedel, H.:Ein neues Massenspektrometer ohne Magnetfeld *Zeitschrift Naturforschung* **A8** ,448 (1953).
- [6] W.Paul:Electromagnetic traps for charged and neutral particle *Rev.Mod.Phys.* **62**,531 (1990).
- [7] W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. E. Toschek, and H. Dehmelt:Localized visible Ba^+ mono-ion oscillator *Phys. Rev. A* **22**, 1137 (1980).
- [8] J. J. Bollinger, D. J. Heinzen, Wayne M. Itano, S. L. Gilbert, and D. J. Wineland:Test of the linearity of quantum mechanics by rf spectroscopy of the Be^{+9} ground state *Phys.Rev.Ltte.* **63**,1031 (1989).
- [9] J. J. Bollinger, J. D. Prestage, Wayne M. Itano, and D. J. Wineland: Laser-Cooled-Atomic Frequency Standard *Phys.Rev.Ltte.* **54**,1000 (1985).
- [10] J. I. Cirac and P. Zoller: Quantum Computations with Cold Trapped Ions *Phys.Rev.Ltte.* **74**,4091 (1995).
- [11] Shinsuke Haze, Sousuke Hata, Munekazu Fujinaga, and Takashi Mukaiyama:Experimental determination of p-wave scattering parameters in ultracold $6Li$ atoms *Physical Review A* **87**, 052715 (2013).
- [12] Shinsuke Haze, Sousuke Hata, Munekazu Fujinaga, and Takashi Mukaiyama:Auto-relock system for a bow-tie cavity for second harmonic generation *Review of Scientific Instruments* **84**,026111 (2013).