

カルシウムイオンの $S_{1/2} - D_{5/2}$ 遷移スペクトルの測定及びキャリアとサイドバンドの特定

向山研究室 中井 良輔

平成 28 年 3 月 8 日

1 目的

我々の研究室では冷却された ${}^6\text{Li}$ 原子と ${}^{40}\text{Ca}^+$ イオンの混合系を用いた実験を行っている。現在、 Ca^+ イオンはドップラー冷却を用いて冷却しており、この冷却法における Ca イオンの冷却限界温度は約 $500\mu\text{K}$ であるため、 μK オーダーに冷却された領域での反応を見ることが出来ない。そこで、ドップラー冷却限界より低温に冷却することができるサイドバンド冷却の導入を目指している。

本実験の目的は、 ${}^{40}\text{Ca}^+$ イオンのサイドバンド冷却に利用する $S_{1/2}$ 準位と $D_{5/2}$ 準位間の遷移スペクトルを観測し、キャリアとサイドバンドを分離することである。

2 原理

2.1 内部状態の判別

今回の実験では、図 1 に記されている Ca イオンのエネルギー準位を用いた。本実験で用いる $S_{1/2} - D_{5/2}$ 遷移は四重極子遷移と呼ばれる遷移であり、量子数の変化が ± 2 まで許されている。

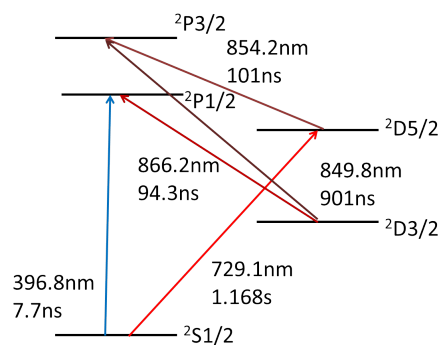


図 1: Ca^+ イオンのエネルギー準位と各準位間の遷移を引き起こす波長及び各準位の平均寿命

電子が $S_{1/2}$ 状態などにいるときは、397nm と 866nm のレーザーを当てる事によって頻繁に励起と放出を繰り返すことになるため、25ms の間に光子を多量放出するが、 $D_{5/2}$ 状態の平均寿命は約 1 秒と長く、 $D_{5/2}$ 状態に励起されている場合は 397nm と 866nm の光を 25ms 間当てても光子の放出が起こらない。これを利用し、本実験では、397nm と 866nm のレーザーを 25ms 当てた間の光子放出量を計測し、Ca イオンの内部状態を判別した。

2.2 サイドバンド冷却

トラップ周波数 ω_z のポテンシャル内にトラップされたイオンのエネルギー準位は、イオンの内部状態とトラップの振動準位による状態の重ね合わせで表現される。このようなイオンに、共鳴周波数 ω からトラップ周波数 ω_z だけ離調 (ここでは低周波側へ離調した場合を考える) したレーザーを当てると、振動準位を一つ下げながら励起状態へと遷移させることができる (図 2)。このような遷移をサイドバンド遷移と呼び、振動準位の変化が無い遷移はキャリア遷移と呼び区別される。図 2 のようにサイドバンド遷移を起こした後、自然放出により $\hbar\omega$ のエネルギーを放出させることができると、最初の状態からエネルギー $\hbar\omega_z$ だけ失うことになる。これがサイドバンド冷却の原理である。

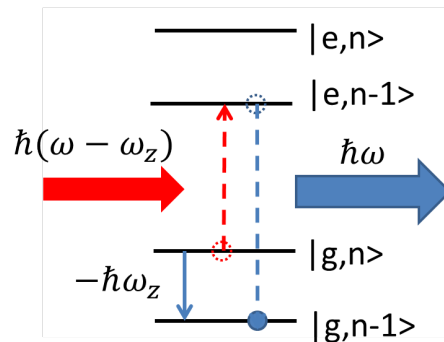


図 2: サイドバンド冷却の基本原理

サイドバンド冷却を行うためには、次の 2 つの条件を満たす必要がある。第一に、サイドバンド遷移のみを誘起させる必要があるため、キャリア遷移とサイドバンド遷移のスペクトルが分離されている必要がある。すなわち、サイドバンド冷却に用いる遷移の線幅がトラップ周波数 ω_z より十分狭くなくてはならない。また、自然放出時に加熱が起こると振動準位が戻ってしまうため、振動準位間のエネルギー $\hbar\omega_z$ が放出時の加熱を定義するリコイルエネルギー $\frac{(\hbar k)^2}{2m}$ より十分大きい必要もある。この条件を満たしているとき、サイドバンド遷移のスペクトルは非常に弱く、また低次のサイドバンドしか現れないと予測される。

3 実験方法と結果

3.1 $D_{5/2}$ 状態の寿命測定

RF トラップ中のシングルイオンに対して、図 3(a) のように 397nm, 866nm 850nm の 3 つのレーザーを入れて実験を行った。この 3 種類のレーザーを入れながら、PMT を通して Ca イオンの蛍光量を観測し、図 3(b) のようなデータを 500 秒分測定した。図 3(b) における蛍光信号が低下している時間が $D_{5/2}$ へと励起されていた時間であると考え、蛍光信号が低下してから再び上昇するまでの時間を計測し、グラフ化したものが図 3(c) である。このグラフに \exp 関数でフィッティングを行い、平均寿命 τ を求めた結果、 $1.176 \pm 0.002 \text{sec}$ となった。この値は先行研究によって得られている値とも十分近く、 $D_{5/2}$ への励起を正確に観測出来ていることが確認できた [1]。

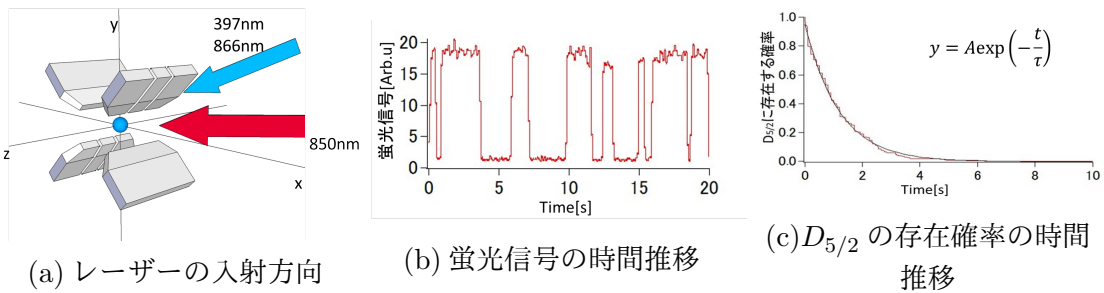


図 3: $D_{5/2}$ 状態の寿命測定

3.2 $S_{1/2} - D_{5/2}$ 遷移のスペクトル測定

図 4 のようにレーザーと大きさ 3.467Gauss の磁場をトラップ中のシングルイオンに印加し、 729nm の発振周波数を磁場によるゼーマン分裂が起こっていない場合の共鳴周波数を基準として 30MHz の範囲で 10kHz ずつ動かして 25ms 間のイオンの蛍光から遷移スペクトルを測定した (図 5)。図中の棒グラフは、ゼーマン分裂した 2 つの $S_{1/2}$ 状態から起こる遷移の理論値であり、図 5(a) ではキャリア遷移の理論値のみを表示しており、図 5(b) の太線はキャリアの理論値を、細い線は i 次サイドバンドが出ると予測される位置を示している。

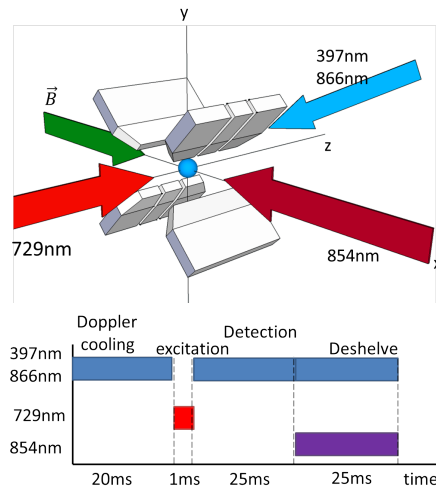
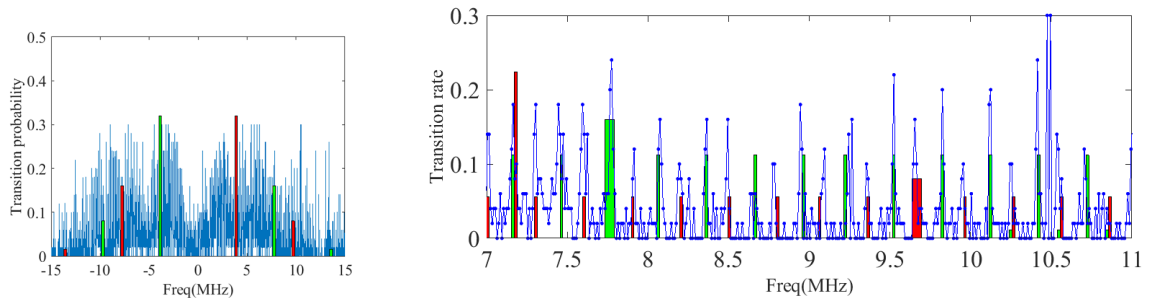


図 4: スペクトル測定時のレーザーと磁場の入射方向とタイムシーケンス



(a) スペクトル全体像とキャリア遷移の理論値 (b) 7-11MHz の範囲のスペクトルとキャリア及びサイドバンドの予測位置

図 5: スペクトル全体像の測定と理論値との評価

図 5(b) を見ると、測定したスペクトルにおいて遷移が起こっている点と、サイドバンド遷移が起こる位置が一致していることから、これらのスペクトルがサイドバンド遷移によるものと確認でき、またキャリアとサイドバンドが分離されていることが確認できた。 n 番目の振動準位にいるイオンの i 次サイドバンド遷移の強度は、ラムディッケパラメータ $\eta = \sqrt{\frac{(\hbar k)^2}{2m \times \hbar \omega}}$ という値を用いて

$$\Omega^{ni} = \eta^{|i|} \left(\frac{(n + |i|)!}{n!} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{|i|!} \times \Omega_{\text{carrier}} \quad (1)$$

という式から計算できる。この式によると、高次のサイドバンドになるほど急激に遷移強度が低下するはずであるが、実測したスペクトルにはそのような形が表れておらず、高次のサイドバンドであっても元となるキャリア遷移と同程度の遷移強度を持つものが多く、遷移強度については正確な値を得ることが出来ていない可能性が考えられる。各データ点では 50 回の測定を行っているが、その測定時のイオンの振動準位を一定にできていないため、遷移強度の理論値も一定ではない。これが正確に遷移強度を測れない原因と推測される。

4 まとめと今後の展望

スペクトルの測定結果から、カルシウムイオンの $S_{1/2} - D_{5/2}$ 遷移のキャリアとサイドバンドが十分に分離できており、サイドバンド冷却をするための第一の条件は満たしていることが確認できた。

今後は、ラムディッケパラメータ η が十分小さくなるような実験系へ置き換えることで、サイドバンド冷却の実現を目指したい。

参考文献

- [1] P. A. Barton, C. J. S. Donald "Measurement of the lifetime of the $3d^2D_{5/2}$ state in $^{40}\text{Ca}^+$ " Physical Review A 62 032503 published 2000