

論文の内容の要旨

論文題目 中赤外領域の遷移を用いたレーザー冷却とその応用

氏 名 橋口 幸治

レーザーが実用化されて半世紀、その進歩は目を見張るほどである。それにより様々な技術が生まれてきたが、今回注目したいのは、レーザーを原子に照射することで原子を止める、原子を冷やす技術、「レーザー冷却」である。レーザー冷却は、光と原子の相互作用により、原子に動きを妨げる力を加え続けることによって、原子を止める技術である。原子を止めることによって、観測する際に生じるドップラーシフトの影響を少なくすることができ、それにより、原子のスペクトルなどを正確に調べることができる。

正確な原子スペクトルの観測は、光格子時計などの周波数標準の開発に繋がる。今回は、ストロンチウム原子の中赤外領域の遷移($5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$)を用いたレーザー冷却を行うことで、ストロンチウム原子(Sr)光格子時計の精度の向上を試みる。

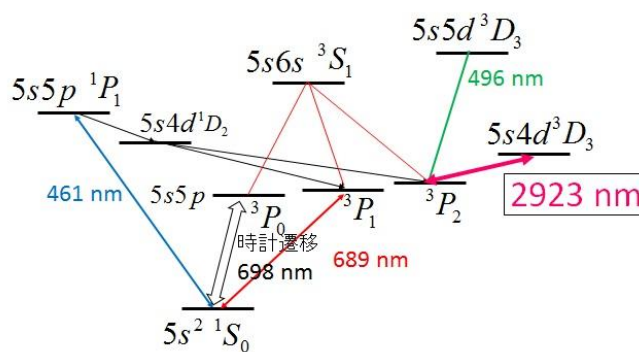


図1 ^{88}Sr のエネルギー図

今回、この遷移に注目した理由は以下の3点である。

- ・遷移波長が長いため、冷却限界温度である反跳温度が低い

レーザー冷却においては、自然放出をエネルギー散逸過程に用いているため、原子の運動量変化は光子の運動量で量子化されている。そのため、光子1個の反跳エネルギー以下にまで冷却できない。反跳エネルギーは遷移波長の2乗に反比例するため、波長が長いほど冷却到達温度は低くできる。(今回の遷移では反跳温度は約13nK)

- ・ $5s4d^3D_3$ 準位の寿命を知ることで、時計遷移の黒体輻射シフトの評価ができる

現在、Sr光格子時計の正確さを制限している主な要因は、黒体輻射による光シフトによって時計遷移($5s^2\ ^1S_0 - 5s5p^3P_0$)の絶対周波数がずれるシフト、黒体輻射シフトである。このシフトを評価するとき、 $5s4d^3D_3$ 準位の寿命は重要な指標となる。 $5s4d^3D_3$ 準位の寿命を知ることで、 $5s4d^3D_1$ の寿命もわかるため、時計遷移の上準位 $5s5p^3P_0$ のdynamic Stark shiftを評価することができる。

- ・冷却時間の短縮により、時計の安定度を向上できる可能性がある

時計の安定度(いかに早く狙った精度に到達できるかの指標)はアラン分散で評価できる。これは一回の測定に必要な時間が短いほど小さくすることができる。時計遷移の測定一回に必要な時間の大半は、原子の冷却・トラップに使われているため、冷却時間の短縮は、安定度の向上に直接繋がる。また、測定一回における相互作用の時間の割合が増えるので、ディック効果(時計遷移の測定とレーザー周波数へのフィードバックが不連続で周期的であることから生じるエイリアシングの効果)の軽減も期待できる。

以上の点を踏まえて、研究を行った。実際に行ったことは以下の通りである。

- 1、中赤外領域のレーザー光源の開発
- 2、Sr原子の $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移の周波数測定
- 3、 $5s4d^3D_3$ 準位の寿命測定による時計遷移の黒体輻射シフトの評価
- 4、 $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移を用いた磁気光学トラップ(MOT)、及びモラセスの生成
- 5、Sr光格子時計の安定度向上に向けた高速冷却

1、中赤外領域のレーザー光源の開発

中赤外領域の光は、検出が難しく、水の吸収がある等、扱いが難しいこともあり、この領域のレーザー光源はあまり発達していない。そこで、今回はレーザー光源の作成、安定化から始めた。作成したのは、周波数測定用のレーザー(広範囲(GHz)以上を掃引可能で周波数の再現性のあるレーザー)及び、冷却用のレーザー(掃引能力は低くても良いが、狭線幅(レーザー線幅がkHz以下)のレーザー)である。周波数測定用レーザーは、光パラメトリック共振器(Linos社のOS4000)を使用し、Rb時計に安定化したファイバコムを用いて周波数安定化を行った。冷却用レーザーは、熱膨張係数の小さいガラス(Ultra Low Expansion (ULE)ガラス)でできた共振器に安定化した狭線幅(レーザー線幅がHz程度)のレーザーを2つ(波長1558 nmと、波長1062 nm)使用し、1558 nmレーザーの倍波と1062 nmレーザーの差周波発生により作成した。

2、Sr原子の $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移の周波数測定

安定化したレーザー光源を使用して、 $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移の遷移周波数の測定を行った。これまで、この遷移周波数はせいぜい数100 MHz程度の精度でしか知られていなかったが、今回は、この遷移を用いたレーザー冷却、磁気光学トラップが生成できる程度(この遷移の自然線幅、約50 kHzの数倍程度)まで遷移周波数の測定を行った。

3、 $5s4d^3D_3$ 準位の寿命測定による黒体輻射シフトの評価

$5s5p^3P_2$ 状態の原子に $2.9 \mu\text{m}$ レーザーを短時間($30 \mu\text{s}$ 程度)照射した後、 $5s4d^3D_3$ 状態の原子数の減衰の様子を測定することで $5s4d^3D_3$ 準位の寿命測定を行った。これにより、Sr原子の時計遷移($5s5s^1S_0 - 5s5p^3P_0$)の黒体輻射シフトのうちのdynamic Stark shiftの成分の98.2% [M. S. Safronova et al., ArXiv e-prints 1210.7272 (2012)] を評価をすることができた。static Stark shiftの成分の評価は他の研究ですすでに行われているため [T. Middelmann et al., ArXiv e-prints 1208.2848 (2012)]、今回の研究によって、時計遷移の黒体輻射シフト全体の見積りを行うことができたと言える。

4、 $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移を用いた磁気光学トラップ (MOT)、及びモラセスの生成

$5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移を用いて、磁気光学トラップ (MOT)の生成を行った。観測には、 $5s5p^3P_2 - 5s5d^3D_3$ 遷移に対応する 496 nm レーザーを照射し、その蛍光をICCDカメラで撮影することで行った。この時、温度は $10 \mu\text{K}$ 程度であった。さらに冷却するためには、偏光勾配冷却をうまく働かせる必要がでてきた。そこで、磁場を減らして測定、最終的には、磁場を切った状態、光モラセス状態での冷却を試みた。最終

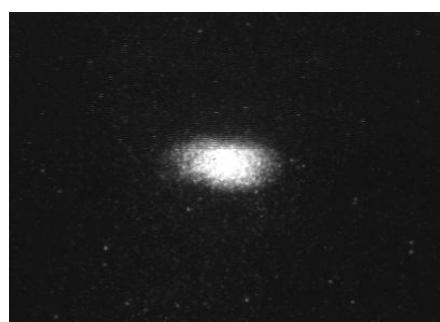


図2 磁気光学トラップ (MOT)

的にはドップラー冷却限界温度に迫る $1 \mu\text{K}$ 程度まで冷却することができた。しかし、反跳温度は 13 nK 程度であり、偏光勾配冷却がうまく働いていれば、 100 nK 程度まで冷却できるはずであった。冷却できない原因としては、衝突シフトや、原子から自然放出された光子の再吸収による加熱などが考えられる。 [J. Grunert and A. Hemmerich, Phys. Rev. A. 65 041401 (2002)]

5、Sr光格子時計の安定度向上に向けた高速冷却

冷却時間が短くなれば、時計測定における測定時間が短くなり、さらにディック効果の抑制も働くため、時計の安定度を向上させることができると考えられる。そこで、 $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移を用いたレーザー冷却を応用することで、高速に μK オーダーの冷却原子ができるように試みた。

これまで、 μK オーダーの原子を生成するために、 $5s5s^1S_0 - 5s5p^1P_1$ 遷移を用いたレーザー冷却、及び $5s5s^1S_0 - 5s5p^3P_1$ 遷移を用いたレーザー冷却の2段階冷却を用いていた。このとき、2つの遷移の基底状態がともに $5s5s^1S_0$ 状態であるため、1段階目と2段階目の冷却は同時にはできず、交互に行う必要があった。1段階目と2段階目の基底状態を別のものにすることができれば、1段階目の冷却を常に行うことができ、冷却時間が短縮できると考えた。そこで、今回行った冷却方法は以下のとおりである。

- ① $5s5s^1S_0 - 5s5p^1P_1$ 遷移を用いたレーザー冷却、
トラップ
(ここで冷却された原子の一部が $5s4d^1D_2$ 状態を
介して $5s5p^3P_2$ 状態に移行する)
- ② $5s5p^3P_2 - 5s5d^3D_3$ 遷移を用いたレーザー冷却、
トラップ
- ③ $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移を用いたレーザー冷却、
トラップ

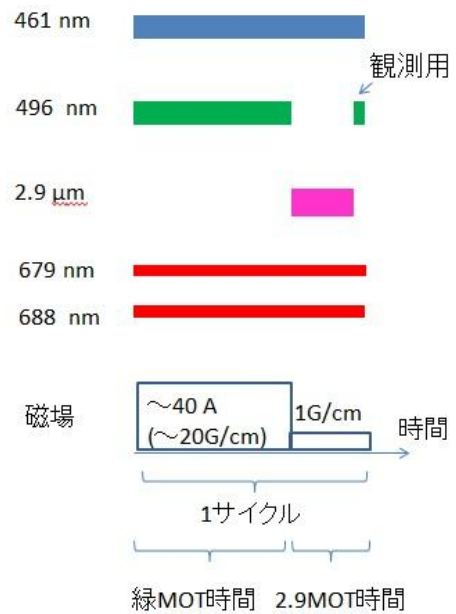


図3 冷却スキーム

①が1段階目の冷却であり、これは常に行うことができる。当初はその後、③の冷却に移行する予定であったが、①の冷却ではmKオーダーまでしか冷却できないこともあり、③のレーザーで束縛できる原子数、冷却可能な原子数を増やすことができなかった。そこで、間に②の冷却を介し、あらかじめ100 μ K程度まで冷却しておくことで、③で冷却できる原子数を増やすことに成功した。最終的には、100 ms以内に μ Kオーダーの冷却原子を生成することに成功した。

本研究により、これまで正確に測定されていなかったSr原子の $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移の遷移周波数、および $5s4d^3D_3$ 状態の寿命を測定することができた。この測定した寿命の値を使用することで、Sr原子の時計遷移 ($5s^2 \ ^1S_0 - 5s5p^3P_0$) の黒体輻射シフトの内の dynamic Stark shiftの成分を評価することができた。測定した $5s5p^3P_2 - 5s4d^3D_3$ 遷移を使用した磁気光学トラップ、モラセスの生成に成功し、 μ K程度の冷却原子を生成することができた。この遷移を用いたレーザー冷却を使用することで、冷却原子を生成する時間を短縮することができた。これにより、将来的に、時計遷移の周波数測定の安定度向上に繋げることができると考える。