

Laser Cooling of Mg⁺ Beam at S-LSR

Mikio Tanabe^{1,A)}, Hikaru Souda^{A)}, Takehiro Ishikawa^{A)}, Masao Nakao^{A)},
Akira Noda^{B)}, Toshiyuki Shirai^{B)}, Hiromu Tongu^{B)}, Masahiro Ikegami^{B)}

A) Graduate School of Science, Kyoto University Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

B) Institute for Chemical Research, Kyoto University Gokasho, Uji-city, Kyoto, 611-0011

Abstract

We carried out the experiment of laser cooling of the 40keV, ²⁴Mg⁺ beam. By using the induction accelerator with the frequency fixed laser, the momentum spread of the stored beam was reduced from 1.7×10^{-3} to 2.9×10^{-4} . When the frequency of the laser was swaped for cooling, the peak of the Schottky signal was suddenly enhanced and it became about 10 times larger than that of normal Schottky signal. We also found that the timing that Schottky signal became its peak depends on the harmonic number of the revolution frequency.

S-LSRにおけるMg⁺ビームのレーザー冷却実験

1. はじめに

リングに蓄積したイオンビームを冷却する手法のひとつにレーザー冷却がある。この方法は、1990年、TSRにおいて、実験的に初めて実現された^[1]。現在、京都大学化学研究所のイオン蓄積・冷却リング"S-LSR"では、極低温ビームの生成を目指したMg⁺ビームのレーザー冷却実験を行っている^[2]。

ここで、レーザー冷却の原理について、簡単に整理する。ビームを構成するイオン中の電子について、エネルギーが2準位であるものを考える(図1)。

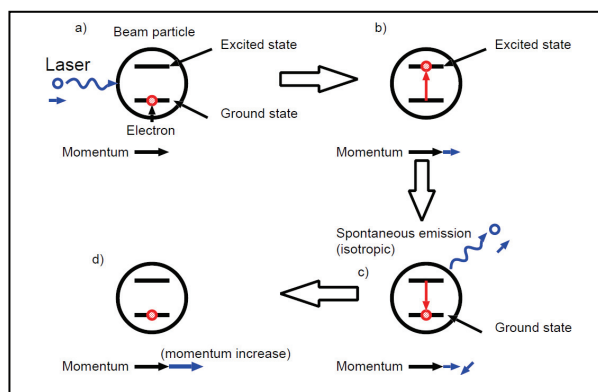


図1：レーザー冷却の概念図

このエネルギー準位に相当する周波数のレーザーが入射すると、イオン中の電子は励起され、吸収した光子の運動量に相当する分の運動量変化が起こる。励起したイオンはある時間後、再び光子を放出して基底状態に戻る。このとき、放出した光子分に相当する運動量変化が起こるが、光子が放出される方向は確率的に等方向であり、結局、多数回の吸収-放出過程を経ると、放出の際の運動量変化はキャンセルされ、レーザーを照射した

方向に運動量が増加する。レーザー冷却はこの原理を利用している。したがって、冷却される速度成分はレーザーを入射した方向である。通常、相互作用する効率から、longitudinal方向にレーザー入射を行うので、longitudinal方向の速度成分が冷却される。

イオンが吸収するレーザーは、イオンがビームとなって運動しているため、ドップラー効果により波長が変化する。実験室系におけるレーザーの周波数を ω_L 、イオンの吸収周波数を ω_0 、イオン速度のレーザー照射方向の成分を v_{\parallel} とおくと、次の関係が満たされる。

$$\omega_0 = \omega_L \gamma \left(1 - \frac{v_{\parallel}}{c} \right)$$

(ただし、 c は光速、 γ はLorentz γ)

レーザー周波数を固定した場合、イオンのmomentum spreadに比べてレーザーを吸収するイオンの速度範囲は1桁以上狭い。したがって、全momentum spread領域のイオンをレーザーと相互作用させるためには、なんらかの工夫が必要となる。これには例えば、ビームの速度を徐々に変化させる方法(ビーム速度スイープ法)や、レーザー周波数を変化させる方法(周波数スイープ法)などがある。

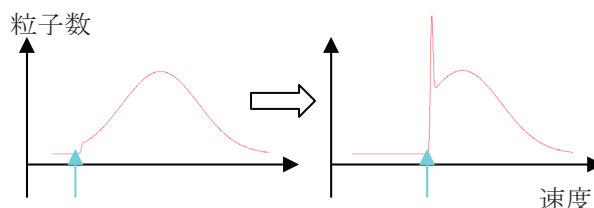


図2：周波数スイープ法の概念図

¹ E-mail: tanabe@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

2. S-LSRにおけるレーザー冷却

これまでにS-LSRで行ったレーザー冷却の実験パラメータとS-LSRの概観は次の表1、図3のようである。

蓄積イオン	$^{24}\text{Mg}^+$
kinetic energy	40keV
遷移準位	$3^2\text{S}_{1/2} \rightarrow 3^2\text{P}_{3/2}$
レーザー周波数	280nm(1074THz)
蓄積ビーム電流	$\sim 2\mu\text{A}$ (Coasting beam)
Tune	(2.1,0.7) (1.5,1.3) (1.4,1.4)
周回周波数 ^[3]	25.2kHz
Beam life ^[4]	約10s

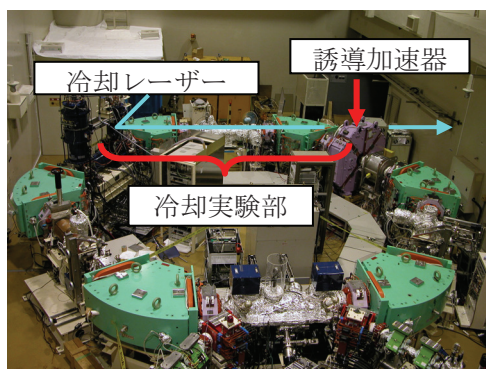


図3：S-LSRの概観とレーザー冷却の関連装置

また実験の際、レーザーとビームの軌道を一致させるために、ビーム軌道のCOD補正、およびレーザーの軌道調整を行った^[3]。

レーザー冷却に用いる波長280nmのレーザー光は、レーザー室内に設置した装置によって発生させる(図4)。最終的に、560nm、10WのNd:YAGレーザーを入力して、280nm(tunable)、40mW程度の冷却用レーザーが得られた。

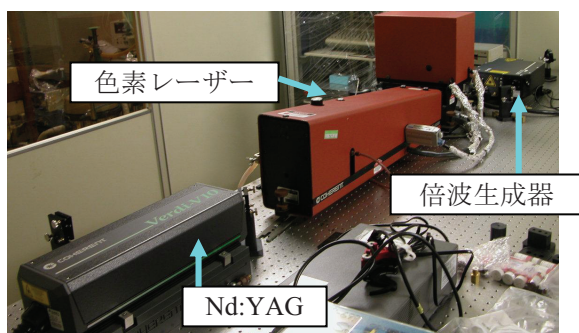


図4：冷却用280nmレーザー生成デバイス

S-LSRでは、レーザー周波数を固定して、ビームの速度を誘導加速器で減速する方法(ビーム速度スイープ法)と、レーザーの周波数を徐々に変化させる方法(レーザー周波数スイープ法)の2通りで

longitudinal方向の冷却実験を行った。ビーム速度の減速は、リング中の誘導加速器(インダック)を用いて行った。また、レーザー周波数の変化は前述のレーザーデバイスのうち、色素レーザーの出力周波数を変化させることによって行った。

冷却効果は、ビームの longitudinal momentum spread測定により確認した。リング中に設置したRFKOの平行平板電極、またはリングQ電磁石の位置に設置されたBPM電極に誘起される電荷をスペクトラムアナライザーで測定し、その周波数成分を観測した。観測する周波数はノイズの影響を考慮して、9倍高調波(226kHz)から20倍高調波(504kHz)を測定した。測定した信号をガウシアンでフィットし、その 1σ の値を信号広がり Δf とした。 $\Delta f/f$ と momentum spread ($\Delta p/p$)の関係は、slip factor η を用いて、

$$\frac{\Delta p}{p} = -\frac{1}{\eta} \frac{\Delta f}{f}$$

のように表される。また、CCDカメラ、PMTによるtransverse方向の自然放出光測定も行った^[5]。

3. 実験結果

3.1 誘導加速器とレーザーによる冷却実験

レーザーと誘導加速器を用いて、レーザー周波数は固定、誘導加速器により蓄積したビーム速度を減速する方法により、ビーム冷却実験を行った。この実験のパラメータは、誘導加速器の電圧が-6mV、レーザー出力が40mW/スポット横5mm×縦8mmであった。

このとき、冷却力の有無で、longitudinal momentum spreadの違いを測定した。測定は、入射から5.5s後におけるSchottky signalの9倍高調波(226kHz付近)を測定した。この結果は次の図5ようになった。

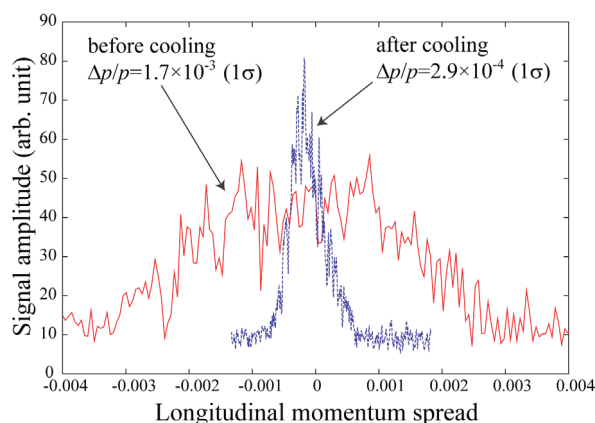


図5：冷却前後でのビームのlongitudinal momentum spreadの変化

この冷却実験の結果、リングに蓄積したcoasting beamについて、longitudinal momentum spread (1σ) が 1.7×10^{-3} から 2.9×10^{-4} に変化した。

3.2 レーザー周波数スイープによる冷却実験

次いで、レーザー周波数をスイープさせる方法でビームのmomentum spreadを変化させる実験を行った。この実験のパラメータは、レーザー出力が約40mWでスポットサイズが $\phi 2\text{mm}$ 、レーザー周波数スイープ速度が10GHz/10s、レーザー周波数スイープの開始タイミングとビーム入射タイミングを一致させる条件で行った。

冷却途中のSchottky signalの変化を観測すると、レーザー周波数の共鳴周波数からのずれ (detuning量) に依存して、Schottky signal powerが突然、通常より1桁程度大きくなる現象が起こった (図6)

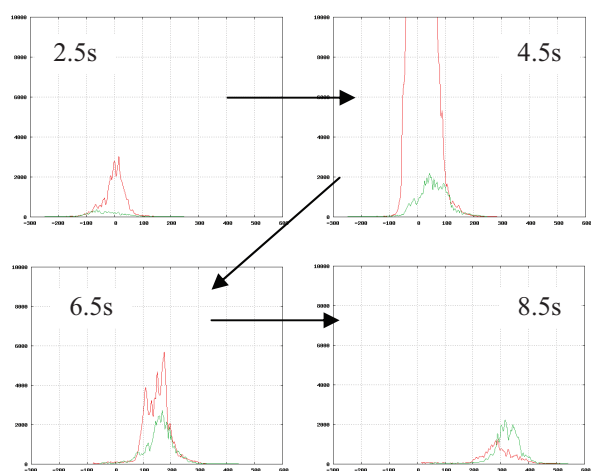


図6：観測したSchottky signalの時間変化。横軸が周波数(相対値)、縦軸が信号強度を表す。左上から右下に向かって2.5s、4.5s、6.5s、8.5s後の信号。赤色(9倍高調波)と緑色(10倍高調波)を比べると、4.5s後に9倍高調波が急激に高くなった。

冷却開始から、レーザー周波数の変化に伴ってSchottky signalのピーク値がどのように変化するかをプロットすると、次の図7のようになった。

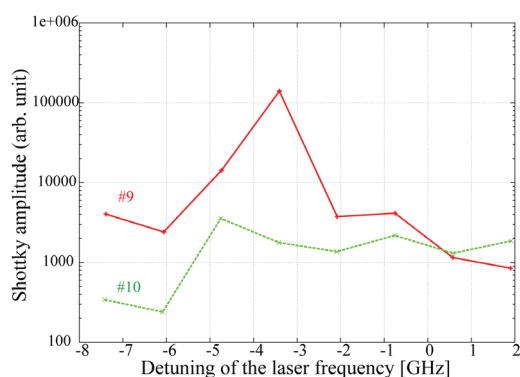


図7：Schottky signal ピークの変化

図7では、ガウシアンでフィットしたSchottky signalのピーク値を、9倍高調波と10倍高調波についてプロットしている。9倍高調波ではレーザー周波数のDetuning量が-3.5GHzあたりでSchottky signalがピークになるのに対し、10倍高調波ではDetuning量が-4.8GHz程度でピークになった。また、9倍高調波のほうが10倍高調波よりも1桁程度、信号強度が高くなっていた。

4. まとめと今後の課題

イオン蓄積リングS-LSRにおいて2種類のレーザー冷却実験を行った。誘導加速器を用いたビーム速度スイープ法では、蓄積した $^{24}\text{Mg}^+$ ビームのlongitudinal momentum spreadが 1.7×10^{-3} から 2.9×10^{-4} に減少することが確認できた。また、レーザー周波数スイープ法では、測定したSchottky signalのピークが、レーザー周波数のスイープに伴って急激に増加する現象を確認した。また、この増加現象は、観測するSchottky signalのharmonic numberによって異なることが分かった。信号強度が急激に増大する原因については、現在解析を進めているところである。

現在のセットアップでは、原理的にlongitudinal方向のmomentum spreadしか冷却できない。S-LSRでのレーザー冷却実験では、最終的に3次元結晶化ビームの生成を目的としており^{[6][7][8]}、これを実現させるにはtransverse方向の冷却も行う必要がある。このため、今後はbunched beamの3次元冷却を行う予定である。

謝辞

本研究は、先進小型加速器事業および、京都大学21世紀COEプログラム「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」の援助を得て、行われました。

参考文献

- [1] S. Schröder, et al., Phys. Rev. Lett. **64**, 2901 (1990)
- [2] Akira Noda, et al., in this proceedings.
- [3] Hikaru Souda, et al., in this proceedings.
- [4] Hiromu Tongu, et al., in this proceedings.
- [5] Takehiro Ishikawa, et al., in this proceedings.
- [6] Masahiro Ikegami, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **9**, 124201 (2006)
- [7] Yosuke Yuri, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **8**, 114201 (2005)
- [8] Mikio Tanabe, et al., AIP Conf. Proc. **821**, 144 (2006)