

Laser Cooling of bunched beam at S-LSR

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

^{A)}Institute for Chemical Research, Kyoto University

Gokasho, Uji-shi, Kyoto 611-0011

^{B)}Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency

8-1 Umemidai Kizugawa-shi, Kyoto 619-0215

^{C)}National Institute of Radiological Sciences

4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555

Abstract

We report the experiment of laser cooling of bunched 40keV $^{24}\text{Mg}^+$ beam with 280nm ultraviolet laser. We measured the bunch length with pick-up electrode and observed a reduction of longitudinal momentum spread. As the laser frequency becomes closer to the center of phase space, the bunch length and the momentum spread becomes smaller.

S-LSRにおけるバンチビームのレーザー冷却

1. はじめに

加速器中のビームは、個々の粒子の運動量にばらつきがあり、有限の速度広がりを持っている。また、空間的にもビームは進行方向、垂直方向に広がりを持っている。通常、ビームの温度は数千Kにもなり極めて高温の状態である。ビームの品質を向上させるために、様々なビーム冷却法が開発されてきた。その種類は確率冷却、電子ビーム冷却、レーザー冷却がある。レーザー冷却は、これらの冷却法の中で最も冷却限界温度が低い。

近年イオントラップ中のイオン集団をレーザー冷却することで実際にクーロン結晶状態を作り出せることが確認されている^[1]。一方で理論的には、蓄積リングを周回するイオンビームを冷却していくと、クーロン結晶がリング中を周回しているのと同様なクリスタルビームが生成可能であると予想されている^[2,3]。また円形イオントラップにおいて、運動エネルギーが1eVという非常に低エネルギーの Mg^+ イオンビームのレーザー冷却によって、3次元のクリスタルビームが生成できたと報告されている^[4,5]。しかし、高速イオンビームの結晶化はまだ実現していない。

高速で運動しているビーム中の粒子をレーザー冷却するとき、レーザーは前方または後方からのみ当てることができるので、直接冷却できるのは進行方向のみである。ビーム粒子の密度が高ければ、クーロン力によって垂直方向にも冷却されるが、より強力な共鳴結合法という方法が提案されている^[6]。シミュレーションによる研究により、共鳴結合法でクリスタルビームを作るには、適切なラティス構造をもつ蓄積リングにおいてシンクロトン振動とベータトロン振動を共鳴させることが必要になる。^[3,7]

京都大学化学研究所のイオン蓄積リングS-LSRは

設計段階からクリスタルビーム生成に必要な条件を考慮に入れ理論的に予言されている条件を満たす動作点でビームを安定に蓄積、冷却できるように考慮されている^[8]。

本研究では、3次元冷却の最初の段階として、シンクロトロンチェーンの小さい状態でバンチビームの冷却ができることを実験的に証明する。また、バンチビームを冷却したときに、ビームを観測する方法を確立する。この論文では、RF電圧によってバンチされた、運動エネルギー40keVの $^{24}\text{Mg}^+$ のバンチビームの、レーザー冷却実験とその結果について述べる。

2. 実験装置

京都大学化学研究所で2005年より稼働しているS-LSRは、6回対称性を持つ周長22.57mの小型イオン蓄積・冷却リングであり、7MeVの陽子を電子ビーム冷却、40keVの $^{24}\text{Mg}^+$ のビームをレーザー冷却する実験が行われている。S-LSRでは、電子ビーム冷却によって極めて低い線密度において陽子を1次元でオーダーリングさせることができた^[9,10]。またレーザー冷却によってビームの進行方向に連続的に分布したコースティングビームの冷却に成功している^[11]。

レーザーシステムは図2の通りのものを用いた。まずポンピングレーザーとしてCOHERENT社のVerdi-V10 (Nd:YVO4, 532nm, 最大出力10W)を使用した。この出力を色素レーザーに入射する。色素レーザーには、COHERENT社のCR-699に、色素Rhodamine 560 Chlorideを使用し、波長は560nm程度の範囲で調節可能で、最大出力は0.96Wである。これをLBO結晶を用いたMBD(倍波発生器)(COHERENT社のMBD-200)に入射し、色素レー

ザーからの光の倍の振動数の紫外線レーザーを発生する。最大出力は60mWである。

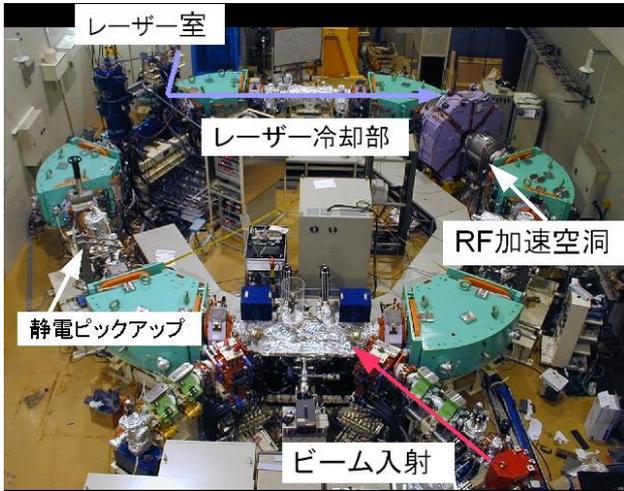


図1 : S-LSR



図2 : レーザーシステム

3. バンチしたビームのレーザー冷却

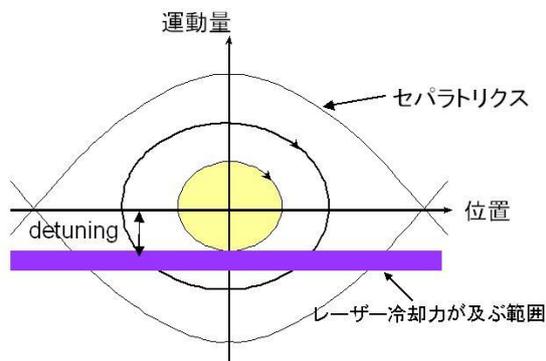


図3 : RF電場内の位相空間内で動く粒子

RF電場の中を動くビームの粒子は、位相空間内であらわすと、図3のセパトリクスと呼ばれる境界の中にバンチされている。ここで、レーザー冷却力は、ある決まった運動量を持った粒子に働くので、位相空間で表すと紫色で示した帯状の領域になる。

粒子はシンクロトロン振動しているが、これを位

相空間で表すと、回転していることになる。すると、やがて粒子はレーザー冷却力が及ぶ範囲に入り、そこで加速されて楕円の領域の中を回るようになる。ただし、レーザーの強度が充分でなければ、粒子がこの範囲に入ってもレーザーと相互作用しない可能性がある。

ビーム粒子がこの小さな楕円の中に閉じ込められたということは、位置の広がりも運動量の広がりも小さくなった、つまり冷却されたということになる。

レーザー冷却力が及ぶ範囲の位置はレーザーの周波数をわずかに変化させることによって変化し、図の中心との周波数差をdetuningといいます。Detuningを小さくするほど粒子は狭い領域に集まると予想できる。

4. バンチ $^{24}\text{Mg}^+$ のレーザー冷却実験

ビームの進行方向への分布を調べるためには、リング内に電極を置いて、ビームによって誘起される電荷を読み出して、その時間変化を調べればよい。

実験では、RFKO電極から来る信号をオシロスコープで読み取り、ビームがリングに入射してから決められた時間後の波形を記録した。変化させたパラメーターは、バンチするRF周波数、RF強度とレーザーの周波数と、ビームが入射してからオシロスコープの波形を記録するまでの時間である。

実験のパラメーターの主なものを表1にまとめた。特に断らないかぎり、実験はこの条件で行った。

パラメーター	値
ビーム運動エネルギー	40keV
ビーム初期運動量広がり	1.7×10^{-3}
ビーム粒子数	6×10^6 個
横方向ビームサイズ	2mm
横方向ビーム温度	460K
ベータトロンチューン	(1.64, 1.20)
周回周波数	25.192kHz
RF周波数	125.96kHz
ハーモニクス	5
RF電圧	3.05V
冷却レーザーの周波数	1074112.0~ 1074116.6 GHz
中心周波数	1074116.55GHz
レーザー強度	5mW
冷却時間	5秒
ビーム寿命	25秒

表 1 : 実験のパラメーター

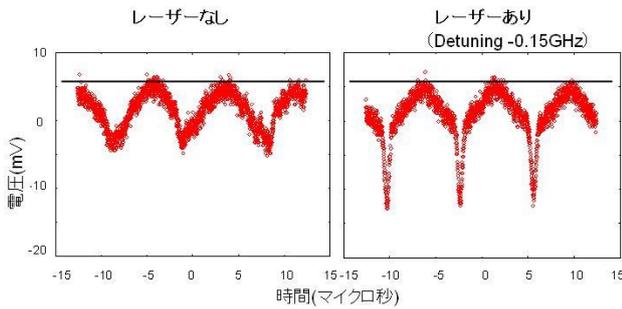


図4：実験結果

RFKO電極からの出力をグラフにしたものが図4である。信号は黒い線をベースラインとして下に出て、信号強度が粒子数に比例する。図4左のレーザーなしの状態ではRFによってバンチされた3つのバンチが見えている。図4右のレーザーありの場合は、バンチの中央にレーザーで冷却されたものが細いピークとして見えている。しかし、冷却されていない部分も残っていて、それはレーザーなしの場合のRFによってバンチされた部分と同じ幅を持っている。

ここで、細いピークの幅が、冷却されたビームのバンチ長さに相当すると考えられる。

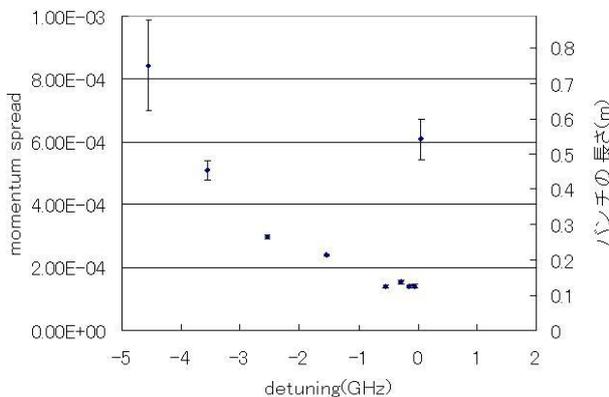


図5：バンチ長とmomentum spreadのdetuning依存性

Detuningを変更したときの、バンチの長さの変化を図5に、示した。また、バンチの長さともmomentum spreadには、

$$\sigma_L = \frac{\beta c \alpha}{2\pi f_s} \beta^2 \frac{m_0 c^2}{E_s} \left(\frac{\sigma_p}{p} \right)$$

の関係があるので、ここからmomentum spreadを求めた。Detuningを0に近づけていくとmomentum spreadも小さくなるが、-1GHz程度で一定になり、0GHzを超えると再びmomentum spreadが大きくなり、冷却されなくなったということが分かる。

また、ビームの進行方向の温度とmomentum spreadには、

$$T_x = \frac{mv_x^2}{k_B} \left(\frac{\sigma_p}{p} \right)^2$$

の関係があるので温度を求めると、数千Kから18Kまで冷却されたといえる。

5. まとめと今後の展望

40keVの $^{24}\text{Mg}^+$ ビームを粒子数 6×10^6 個の条件で、バンチしてレーザー冷却する実験を行ったところ、レーザー冷却された部分とレーザー冷却されていない部分に分かれることが分かった。また、バンチ長から運動量広がりから計算して、温度に直すと、進行方向の温度は、数千Kだったものが18Kになった。Detuningを小さくすると、あるところでバンチ長の減少が止まるが、それはspace chargeの効果により、運動量分散は小さくなくてもバンチ長は短くなっていないという可能性がある。

今後3次元の冷却を行うために、シンクロトロン振動とベータトロン振動を共鳴させ、進行方向と横方向の冷却力を結合させる必要がある。

水平・鉛直方向の運動を結合させるために、ソレノイド磁場を使用し、また、RF電圧とRF周波数をさらに上げる必要があるため、そのためにドリフトチューブタイプRF加速装置を導入して実験を行っている[12]。

- [1] J.J. Bollinger and D.J. Wineland, "Strongly Coupled Nonneutral Ion Plasma" *Phys. Rev. Lett.* **53** 348 (1984).
- [2] A. Rahman and J. P. Schiffer, "Structure of a One-Component Plasma in an External Field: A Molecular-Dynamics Study of Particle Arrangement in a Heavy-Ion Storage Ring", *Phys. Rev. Lett.* **57** 1133 (1986).
- [3] J. Wei, H. Okamoto and A. M. Sessler, "Necessary Conditions for Attaining a Crystalline Beam", *Phys. Rev. Lett.* **80** 2606 (1998).
- [4] T. Schätz, U. Schramm, D. Habs, "Crystalline ion beams", *Nature (London)* **412** 717 (2001).
- [5] U. Schramm, T. Schätz, and D. Habs, "Three-dimensional crystalline ion beams", *Phys. Rev. E* **66**, 036501 (2002).
- [6] H. Okamoto, A. M. Sessler and D. Möhl, "Three-Dimensional Laser Cooling of Stored and Circulating Ion Beams by Means of a Coupling Cavity", *Phys. Rev. Lett.* **72**, 3977 (1994).
- [7] J. Wei, X.-P. Li and A. M. Sessler, "Low-Energy States of Circulating Stored Ion Beams: Crystalline Beams", *Phys. Rev. Lett.* **73**, 3089 (1994).
- [8] A. Noda, M. Ikegami and T. Shirai, "Approach to ordered structure of the beam at S-LSR", *New J. Phys.* **8**, 288 (2006).
- [9] 野田 章・白井 敏之, "イオン蓄積・冷却リングS-LSRの開発と現状", 「加速器」, Vol. 4, No.2, 74-84 (2007).
- [10] T. Shirai *et al.*, "One-Dimensional Beam Ordering of Protons in a Storage Ring", *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 204801 (2007)
- [11] M. Tanabe *et al.*, " Longitudinal and Transverse Coupling of the Beam Temperature Caused by the Laser Cooling of $^{24}\text{Mg}^+$ ", *Appl. Phys. Express*, **1** 028001(2008)
- [12] 想田光 他 S-LSRにおける3次元レーザー冷却の試み WP066 第5回 加速器学会年会 第33回 リニアック技術研究会 (2008)