

Measurement of transverse laser cooling effect using scrapers

Hikaru Souda*^{A)}, Masao Nakao^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Akira Noda^{A)}, Kouichi Jimbo^{B)},
Kazuya Osaki^{C)}, Hiromi Okamoto^{C)}, Yosuke Yuri^{D)}, Manfred Grieser^{E)}, He Zhengqi^{F)},

^{A)}Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

^{B)}Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

^{C)}Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8530, Japan

^{D)}Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency, Takasaki, Gunma, 370-1292, Japan

^{E)}Max-Planck-Institut für Kernphysik, D - 69117 Heidelberg, Germany

^{F)}Tsinghua University, Beijing, 100084, People's Republic of China

Abstract

Transverse beam sizes were measured with use of scrapers during transverse laser cooling experiments. Two scrapers were used; the first scraper was used to reduce the uncooled hot part of the beam, the second scraper was used to measure the beam survival ratio after its insertion. In this measurement, resonant coupling condition of longitudinal and horizontal direction gives the smallest beam sizes of $(\sigma_x, \sigma_y)=(0.5\text{mm}, 1.0\text{mm})$. With changing the delay of second scraper insertion, the horizontal cooling time was measured as 1.7 s in the resonant coupling condition.

スクレイパーを用いた横方向レーザー冷却効果の観測

1. はじめに

京都大学化学研究所のイオン蓄積・冷却リング S-LSR^[1]では、極低温ビーム実現のために $40\text{keV } ^{24}\text{Mg}^+$ のレーザー冷却実験を行っている。ビームはリングを周回しながら進行方向にレーザーによる冷却作用を受け、進行方向の速度広がり初期値から減少していく^[2]。

しかし、レーザーによる冷却力は進行方向にしか作用しないため、横方向の冷却を行うには進行方向の冷却力を横方向に伝えることによって間接的に冷却する必要がある。既にビーム内粒子の散乱 (Intra-Beam Scattering, IBS) を利用して冷却する手法^[3]が行われているが、この手法では粒子数が少なくなり IBS が弱くなると冷却効率が低下するため、少ない粒子数での極低温ビームの実現には不向きである。そこで粒子数が減っても高い横方向冷却力を実現するため、進行方向の冷却力をシンクロ・ベータトロン共鳴結合を用いて横方向に伝達する、共鳴結合による横方向レーザー冷却^{[4][5]}の実験を行っている。これまで、CCD カメラによるレーザー誘起蛍光の測定によって、数十秒間かけての冷却効果は測定できている^[6]が、分子動力学シミュレーション^[7]で予想される数秒以内の早い時間での冷却効果が見えていない。

そのため、スクレイパーを用いてビーム周縁部の冷却されていない高温粒子を減らす^[8]と共に、スクレイパー挿入時のビーム残存率を測定することで、冷却開始後の早い時間におけるビームサイズを測定することを試みた。

2. 実験セットアップ

S-LSR の $^{24}\text{Mg}^+$ の全体図を図 1 に示す。イオン源の静電高圧で 40keV まで加速された Mg ビームは 25 度合流磁石で偏向された後開口 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ の x-y スリットを通り、セプタム電磁石とパルス静電キッカーによって蓄積リングにシングルターン入射する。入射後、冷却

されていない粒子の影響を除くために、スクレイパーを 2 個使用し、1 個目のスクレイパーで粒子数を大きく削り、2 個目のスクレイパーの挿入深度を変えて残存率を測定しビームサイズを算出した。粒子数を削るスクレイパーは図 1 右側の入射直線部にあるスクリーンモニタ SCME1(H.Scraper1) で、水平・鉛直のビームサイズ測定を行うスクレイパーは水平が入射直線部の SCME2(H.Scraper2)、鉛直がレーザー冷却部のスクリーンモニタ V.Scraper である。H.Scraper1 は直線部中心から 30cm 下流、H.Scraper2 は直線部中心から 30cm 上流に位置する。V.Scraper の位置は直前の四重極磁石の終端から 44cm である。

シンクロ・ベータトロン共鳴結合のために RF によるバンチングを行う。これには、 $h=100$ に対応し、Transit Time Factor が 0.9 と大きい 2-Gap ドリフトチューブを用いた。粒子数の測定は、DC-CT で校正した平行平板 Electrostatic Pickup の信号強度を用いた。

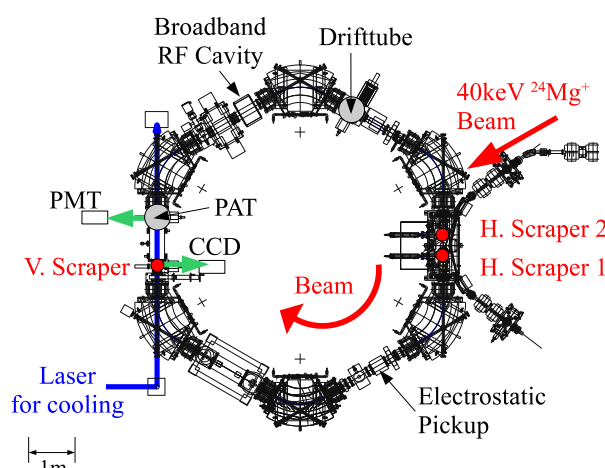


図 1: S-LSR 要素配置図

*souda@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

実験時のパラメータは表1の通りである。ベータatronチューンは(2.072,1.120)、シンクロ・ベータatron共鳴の条件である $\nu_s - \nu_x = \text{integer}$ を満たすシンクロatronチューンは0.072である。H.Scraper1, H.Scraper2, V.Scraperでの β 関数はそれぞれ $(\beta_x, \beta_y)=(1.61\text{m}, 2.84\text{m}), (0.92\text{m}, 3.75\text{m}), (0.89\text{m}, 4.11\text{m})$ である。

表 1: S-LSR 実験パラメータ

蓄積リング周長	22.557m
イオン種	$^{24}\text{Mg}^+$ (40keV)
ベータatronチューン	(2.072,1.120)
シンクロatronチューン	0.038, 0.072
入射粒子数	1×10^7
初期運動量広がり	7×10^{-4}
周回周波数	25.1668kHz
RF周波数	2.51668MHz (h=100)
レーザー Detuning	-0.2GHz ($\delta p/p = 1 \times 10^{-4}$)
冷却部レーザー径	0.33 mm(1 σ)
レーザー出力	3~10mW

スクレイパー挿入時のビーム強度の変化は図2のようになり、この例では $t=0\text{s}$ での入射 ($N \sim 10^7$) と同時に Scraper1 が初期位置(リング内側 15mm)から動き出し、 $t=2\text{s} \sim t=3\text{s}$ にかけて中心から一定の位置まで到達して残量 10^5 個程度までビームを切り、その位置で静止する。この $t=3\text{s}$ からレーザー入射部のメカニカルシャッターを開けてレーザー冷却を開始する。この時点から一定の Delay を挟んで、Scraper2 がビーム中心に向かって移動し、一定の深度まで到達して静止する。Scraper2 が粒子数を削った $t=5\text{s} \sim t=7\text{s}$ での粒子数を測定し、その残存率を得ることによって、Scraper2 の位置より内側にある粒子数の割合を図4のように算出でき、これを Gaussian として Fit することによりビームサイズを算出できる。

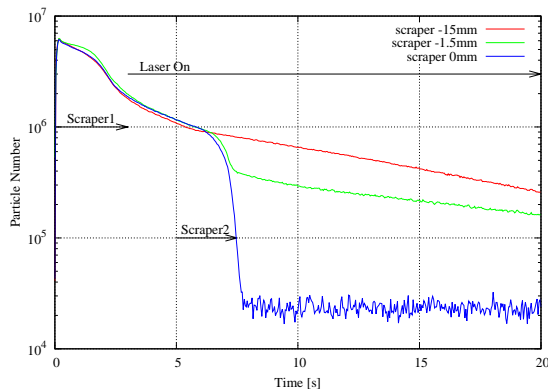


図 2: スクレイパー挿入時の粒子数の時間変化

この fitting を行う上で、図4のように理想的な Gaussian に比べて内側が低くなっている結果がある。誤差要因として、ビーム中心はスクレイパー挿入時のビーム残存量がゼロになる点として毎回実測しているが、5mm/s で動かした際のスクレイパー位置の再現性誤差

が $\pm 0.1\text{mm}$ あることから、Gaussian 中心が $\pm 1\text{mm}$ の範囲内で残差が最小となるように Fitting を行った。また、粒子数が減ってくると粒子数 1×10^4 個に相当するプリアンプノイズが Scraper2 によるもとの信号強度に近くなってくるため、 5×10^4 個以下では 20~50% の誤差が生まれる。

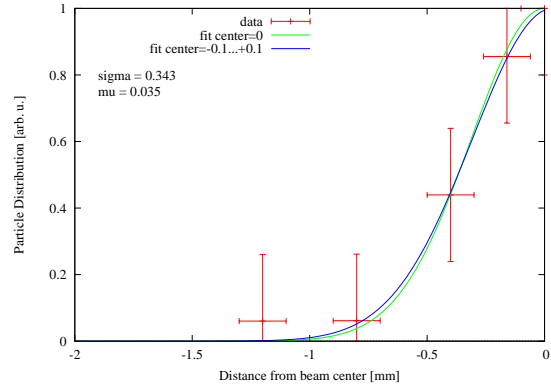


図 3: 残存率から再構成した水平ビームプロファイル。 $N = 5 \times 10^4$ 、共鳴条件での測定。

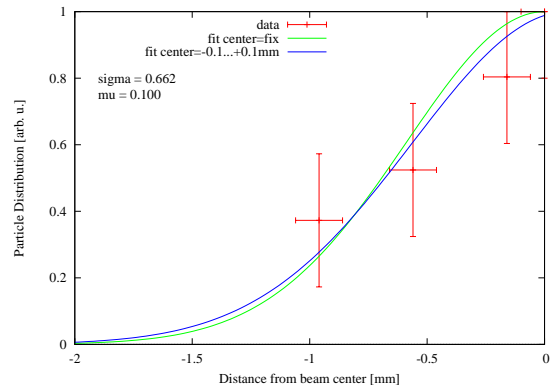


図 4: 残存率から再構成した水平ビームプロファイル。 $N = 1 \times 10^5$ 、共鳴条件での測定。

3. 実験結果

以上から水平方向と鉛直方向のビームサイズを測定し、粒子数を変化させた時の挙動を調べた。測定条件は、共鳴状態でレーザー冷却 ON、非共鳴状態でレーザー冷却 ON、レーザー冷却 OFF の 3 通りで行った。図 5, 6 がその結果で、全体の傾向として粒子数の減少に伴ってビームサイズが減少しており、 2×10^4 個以上の粒子数では、共鳴の有無によらずレーザー冷却によってビームサイズが減少しており、IBS による効果が残っていると考えられる。ただしシンクロ・ベータatron結合による共鳴状態では、水平方向のビームサイズが 0.45mm と、非共鳴状態の 0.75mm より小さくなっている。また、共鳴結合のない鉛直方向のビームサイズについても、 $N < 5 \times 10^4$ では測定ごとのばらつきが大きく有意な評価はできないが、 $N > 8 \times 10^4$ では共鳴状態の方が

20-30%サイズが小さくなっている。これは、鉛直方向はIBSによって進行方向だけでなく水平方向とも熱的接触があるため、水平方向の温度が低い方が鉛直方向の平衡温度も低くなっていると予想される。

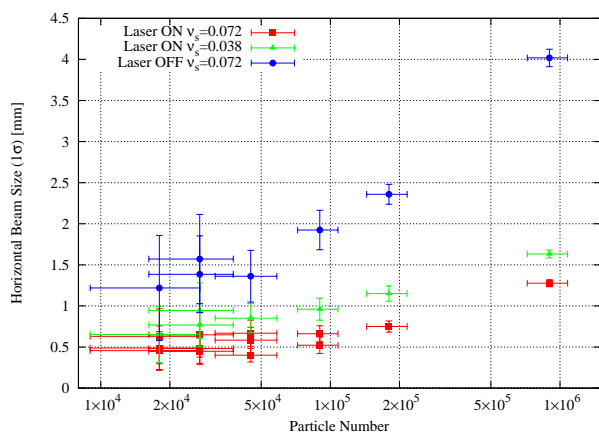


図 5: 水平方向ビームサイズと粒子数の関係。測定時のレーザー強度は 3mW。

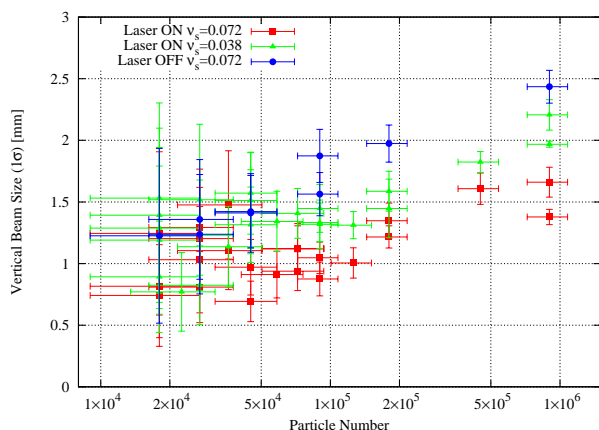


図 6: 鉛直方向ビームサイズと粒子数の関係。測定時のレーザー強度は 9mW。

さらに、冷却開始直後のビームサイズの変化を調べるため、共鳴冷却時において Scrapper2 を動かし始めるまでの Delay を変化させ、到達時間を冷却開始 0.5 秒後から 6 秒後まで変えてビームサイズを測定した。測定結果は図 7 の通りで、1/e 冷却時間は 1.7 秒で、3 秒以降はビームサイズがほぼ一定となっており、数秒のオーダーで横方向の冷却が進行する結果が得られた。

以上の測定によって、スクレイパーによって粒子数を減らし、冷却を効率化すると共に、スクレイパー挿入後のビーム残存率を測定してプロファイルを再構成することができた。ただし、静電ピックアップのノイズレベルのために、安定した測定ができるのは $N \geq 5 \times 10^4$ 個に限られており、ノイズレベルをさらに低減し、より少ない粒子数での冷却効果を調べるのが今後の課題である。

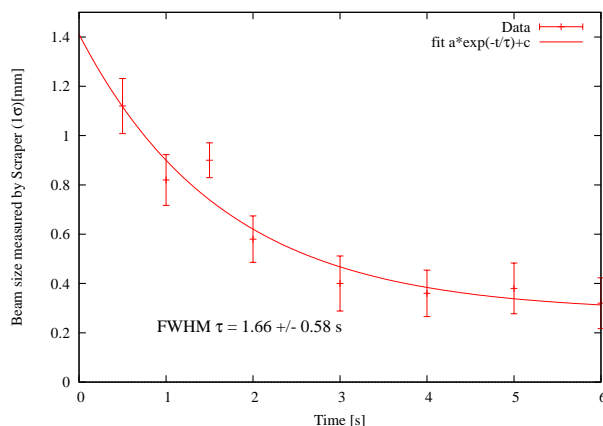


図 7: 共鳴条件での水平方向ビームサイズの変化。横軸は冷却開始からの時間。1/e 冷却時間は 1.7 秒で、3 秒以降はビームサイズがほぼ一定となっている。

4. まとめ

イオン蓄積・冷却リング S-LSR で、シンクロ・ベータatron共鳴結合による間接的な横方向レーザー冷却の実験を行い、スクレイパーをビーム中心に向けて挿入し、ビーム信号強度から粒子の残存率を測定することで、ビームの分布を再構成することでサイズ測定を行った。実験ではスクレイパーを 2 枚用い、1 枚目のスクレイパーをビーム中心近くまで挿入して粒子数を $10^4 \sim 10^5$ まで減少させ、2 枚目のスクレイパーをビーム中心から 0.3mm~1.6mm まで挿入深度を変えてビーム残存率を測定することで、水平方向・鉛直方向共に共鳴結合条件の時にビームサイズが非共鳴時に比べ 20~40% 小さくなる結果が得られ、また、サイズ測定のタイミングを変えることで、ビーム冷却時間が 1.7s で、レーザー照射開始後 3 秒で冷却が完了する様子を測定した。

5. 謝辞

本研究は先進小型加速器開発事業、京都大学グローバル COE プログラム「普遍性と創発性から紡ぐ次世代物理学」、および科学研究費補助金 (特別研究員奨励費) の補助を得て行われました。

参考文献

- [1] A. Noda: Nucl. Instrum. Methods **532** (2004) 150.
- [2] M. Tanabe *et. al.*: Applied Physics Express **1** (2008) 028001.
- [3] H.-J. Miesner *et. al.*: Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 623.
- [4] H. Okamoto, A. M. Sessler and D. Mohl: Phys. Rev. Lett. **72** (1994) 3977.
- [5] H. Okamoto: Phys. Rev. E **50** (6) (1994) 4982.
- [6] M. Nakao *et. al.*: Submitted to Phys. Rev. ST-Accel. Beam.
- [7] Y. Yuri and H. Okamoto: Phys. Rev. ST-AB **8** (2005) 114201.
- [8] A. Noda *et. al.*: WELR03, in this proceedings.