

## ORDERING TRANSITION OF THE ELECTRON COOLED PROTON BEAM

Toshiyuki Shirai<sup>1,A)</sup>, Mikio Tanabe<sup>A)</sup>, Hikaru Souda<sup>A)</sup>, Masahiro Ikegami<sup>A)</sup>, Hiromu Tongu<sup>A)</sup>,  
Akira Noda<sup>A)</sup>, Koji Noda<sup>B)</sup>, Manfred Grieser<sup>C)</sup>, Igor N. Meshkov<sup>D)</sup>, Alexander V. Smirnov<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

<sup>B)</sup> National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba 263-8555, Japan

<sup>C)</sup> Max-Planck-Institut für Kernphysik, D-69029 Heidelberg, Germany

<sup>D)</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Joliot Curie 6, Dubna 141980, Russian Federation

### Abstract

The one-dimensional ordering experiment of protons has been performed using the electron cooling at S-LSR. The first proton ordering has been successfully confirmed and the abrupt drop in the momentum spread has been observed at a proton number of 2000 with electron currents of 25 mA, 50 mA and 100 mA. The transition temperature of the proton ordering is 0.17 meV in the longitudinal direction. Below the transition, the longitudinal proton temperature is cooled down to 26  $\mu\text{eV}$ , which is close to the longitudinal electron temperature. The results of the beam simulations using the molecular dynamics method also agree well with the experimental results.

## 電子ビーム冷却された陽子ビームのOrdering相転移

### 1. はじめに

ビーム冷却とは、円形加速器に蓄積された粒子ビーム（特にイオンビーム）に対し、散逸力を導入することにより、次式で定義されるビーム温度Tを下げる技術である。

$$\frac{3}{2}k_B T = \frac{1}{2}m_i \langle v_i^2 \rangle \quad (1)$$

ここで、 $m_i$ と $v_i$ は、それぞれイオンの質量と、ビーム重心系でみた速度であり、 $\langle v_i^2 \rangle$ は、その2乗平均をあらわしている。

ビーム温度が下がるにつれて、運動量広がりやエミッタンスは低下していくが、ある点までビーム温度が下がると、ビーム構造が相転移を起こして、整列(Ordering)、または結晶化を始めることが、理論的には予言されている<sup>[1]</sup>。電子ビーム冷却を用いた、ビーム相転移の先駆的な研究は、INPのNAP-Mで、陽子を冷却しておこなわれた<sup>[2]</sup>。この実験結果が相転移を示すかどうかは、現在でも論議が続いているが、後にGSIのESRで多価の重イオンを冷却したところ、ある点で、突然運動量広がり不連続に低下する現象が発見された<sup>[3]</sup>。この現象はシミュレーションによる解析から、ビームが一次元上に並んで、相互に追い越しをしない状態になったと考えられている<sup>[4]</sup>。しかし、クーロン相互作用が弱い陽子ビームが、このような現象をおこすのかどうかは、これまで不明であった。

我々は京都大学化学研究所に設置されているイオン蓄積リングS-LSRをもちいて<sup>[5]</sup>、電子ビーム冷却された陽子の相転移実験をおこなった<sup>[6]</sup>。表1に実験時のリング並びに陽子ビーム、電子ビーム冷却装

置のパラメータを、図1にもちいた電子ビーム冷却装置を示している。

表1 陽子の相転移実験時のパラメータ

Beam	
Ion Species	Proton, 7 MeV
Revolution Frequency	1.61 MHz
Life Time (with Cooling)	$1.7 \times 10^4$ sec
Ring	
Betatron Tune	(1.645, 1.206)
Maximum $\beta$ -function	(3.9 m, 3.2 m)
Maximum Horizontal Dispersion	1.8 m
Momentum Compaction	0.502
Vacuum Pressure	$1 \times 10^{-8}$ Pa
Electron Beam	
Energy	3.8 keV
Beam Current	25 mA, 50 mA, 100 mA
Beam Diameter	50 mm
Beam Density	$2.2 \times 10^6$ $e^-/\text{cm}^3$ at $I_e=25$ mA
Expansion Factor	3



図1 S-LSRに設置されている電子ビーム冷却装置

<sup>1</sup> E-mail: shirai@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

## 2. ビーム相転移実験

電子ビーム冷却では、実験条件を一定に保ちながら冷却力を変化させることは難しいため、冷却力を一定に保ったまま、蓄積陽子数を減少させることで、Intrabeam Scattering (IBS) による、加熱レートを低減して、ビーム温度を減少させていった。GSIにおける実験では、蓄積イオン数が1万個以下で、相転移が観測されているため、陽子においても、1万個以下でも測定可能なビームモニターを開発する必要があった。

まず、蓄積陽子数は、残留ガスイオン化モニターを用いて、イオン化された残留ガス分子の個数を計数することで非破壊的に求めた<sup>[7]</sup>。この手法による最小測定粒子数は陽子500個 (0.13nA)であった。ビーム温度は、運動量広がりやビームサイズ(エミッタンス)から計算することができる。実験時は、RF電圧は印加されておらず、連続ビームなので、運動量広がりや、ショットキーノイズスペクトルの周波数広がりから計算した。図2に用いたヘリカルピックアップの模式図と写真が示されている<sup>[8]</sup>。電極は11.5ターンで、そのピッチ $L_p$ は、7 MeV陽子ビームの速度 $\beta c$ に合わせて、

$$2\beta(L_w + L_h) = L_p \quad (2)$$

という関係を満たすように設計されている。このピックアップによる運動量広がりやの測定限界は陽子1000個 (0.26nA)であった。また、ビームサイズは、スクレーパーによって測定した。

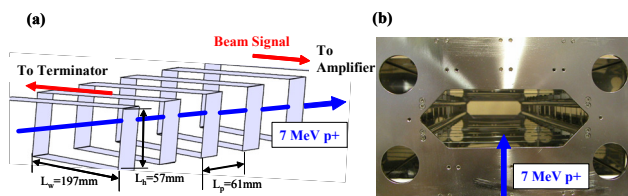


図2 ヘリカルピックアップ型ショットキーノイズモニターの模式図(a)と実物の写真(b)。

粒子数と運動量広がりやの相関の測定結果を図3に示す。実験開始当初のデータは、図3(a)のようになっていた。陽子数を減らしていても、途中で運動量広がりやが一定になっているが、これは、IBS以外に、外部からの加熱要素があるためと考えられる。この実験の後、リングの電磁石電源や電子ビーム加速電源のリップルを減少させると共に、イオンビームと電子ビームの軸のアライメントを最適化したところ、同様の測定で、図3(b)のようになった。このときの電子電流は、25 mAである。陽子が2000個付近まで減少した時に、はじめてBeam Orderingと見られる運動量広がりやの急激な減少を観測することに成功した。このときの、ビーム進行方向の相転移温度は2 Kに相当する。

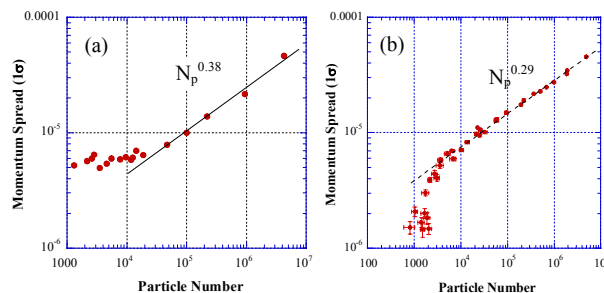


図3 粒子数と運動量広がりやの相関の測定結果。電源リップルやビーム-ビームアライメントの最適化前(a)と後(b)の結果<sup>[6]</sup>。

電子電流を25, 50, 100 mAと変化させていくことで、冷却力をかえたときのデータを図4(a)に示す。冷却力が変化しても、相転移温度にあまり大きな差は見られなかった。また、転移後の運動量の広がりから、進行方向のビーム温度を計算すると、 $26\mu\text{eV}$  (0.3K)となる。この値は、冷却に用いられる電子ビームの進行方向温度の推定値 ( $20\mu\text{eV}$ )に近い値となっている。つまり、OrderingによりIBSが抑制されたことによって、理論的な冷却限界である、電子温度まで、陽子ビームは冷却されていると考えられる。図4(b)では、蓄積陽子数が数千個の点で、ショットキーノイズパワーにも異常が見られている。これは、Orderingにより粒子分布がもはやランダムでなくなったことにより生じたと考えられる<sup>[9]</sup>。

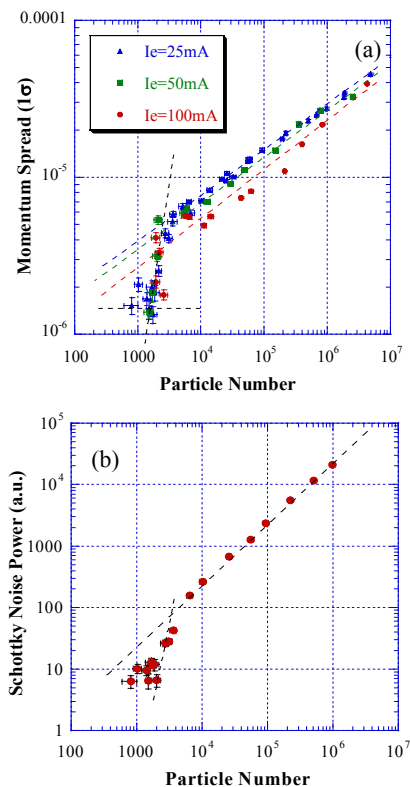


図4 電子電流を25, 50, 100 mAと変化させたときの、粒子数と運動量広がりやの相関(a)と、電子電流を25mAのときの粒子数とショットキーノイズパワーの相関(b)<sup>[6]</sup>。

### 3. ビームシミュレーション

図4に見られた運動量広がりやショットキーノイズパワーの急激な減少が、Beam Orderingによるものかどうかを確認するために、BETACOOlコード<sup>[10]</sup>をもちいて、ビームシミュレーションをおこなった。粒子間クーロン相互作用は、分子力学的手法を用いて計算している。典型的なセル長は5 cm程度であり、1セルあたりの粒子数は、6-10個である。一方、電子ビーム冷却は、その冷却力の線形部分の実測値から求めた一定の冷却レートとして取り扱っている。

図5(a)は、粒子数が1000個から10000個の範囲で、粒子数と運動量広がりとの相関の、シミュレーション結果と実験データを示している。この結果から、シミュレーションにおいても、実験データに近い粒子数(4000個)で、急激に運動量広がりが減少することが再現された。また、ビーム温度が、相転移温度以下になると、予想されたように進行方向追い越しがなくなって、IBSが抑制されることが、シミュレーションでも確認された。

図5(b)は、粒子数が2000個と6000個の時に、位相空間で、どのような冷却過程をとるかを示したものである。明らかに、6000個のときは、IBSによるビーム加熱に阻まれて、ビーム温度が平衡点で止まっているが、2000個の場合には、IBSに阻まれることなく、冷却されていることがわかる。

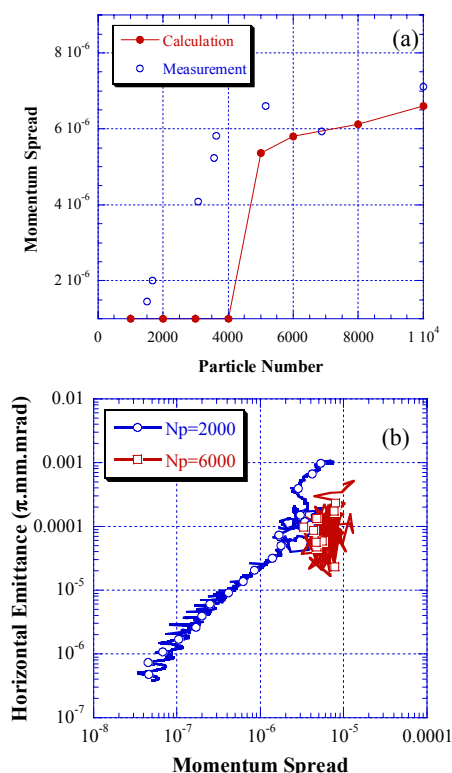


図5 粒子数が1000個から10000個の範囲での、粒子数と運動量広がりとの相関のシミュレーション結果と実験データ(a)。および、粒子数が2000個と6000個の時の、位相空間での冷却過程(b)。

### 4. まとめ

このS-LSRにおける実験により、多価の重イオンビームと同様に、クーロン相互作用の弱い陽子ビームにおいても、十分にビーム温度が下がれば、“One-dimensional Beam Ordering”の相転移をおこすことがわかり、これがイオンビームに普遍的な現象であることが明らかになった。また、相転移後のイオンビームの温度は、電子温度の進行方向推定値に近い値まで冷えており、相転移後は、IBSがビーム温度を制限していないことを、実験的に示すことができた。

分子力学的をもちいたビームシミュレーションによっても、この実験結果はほぼ再現できており、イオンビームのIBSの状態が変化することにより、この運動量広がりの不連続的な減少が起きていると考えられる。

### 5. 謝辞

電子ビーム冷却装置の製作においては、東芝(株)の方々にも、多大なご協力をいただきました。この場を借りて、御礼申し上げます。また、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、おこなわれました。

### 参考文献

- [1] J.P.Schiffer and P.Kienle, “Could there be an ordered Condensed State in Beams of Fully Stripped Heavy Ions”, Zeitschrift für Physik A, **321**, 181, 1985.
- [2] V.V.Parkhomchuk, “Physics of Fast Electron Cooling”, Proc. of Workshop on Electron Cooling and Related Applications (ECool84), Karlsruhe, 71, 1984.
- [3] M.Steck et al., “Anomalous Temperature Reduction of Electron-Cooled Heavy Ion Beams in the Storage Ring ESR”, Physical Review Letters, **77**, 3803, 1996.
- [4] R.W.Hasse, “Theoretical Verification of Coulomb Order of Ions in a Storage Ring”, Physical Review Letters, **83**, 3430, 1999.
- [5] A.Noda et al., “Status of Ion Storage, Cooler Ring, S-LSR”, Proc of this conference.
- [6] T.Shirai et al., “One dimensional beam ordering of protons in a storage ring”, Physical Review Letters, **98**, 204801, 2007.
- [7] S.Fujimoto et al., “Beam Monitoring System and Orbit Correction in S-LSR”, Proc. of 36th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop (NANOBEAM2005), Uji, 441, 2005.
- [8] H.Yonehara et al., “Equipments For Momentum Cooling At Tarn”, INS Report No. INS-NUMA-49, 1983.
- [9] H.Danared et al., “Model and Observations of Schottky-Noise Suppression in a Cold Heavy-Ion Beam”, Physical Review Letters, **88**, 174801, 2002.
- [10] I.Meshkov et al., “Physics guide of BETACOOl code Version 1.1”, BNL Note C-A/AP/262, 2006.