

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19540290
 研究課題名 (和文) 電子ビーム冷却による相転移現象を利用した極小エミッタンス
 イオンビームの実現
 研究課題名 (英文) Generation of Ultra Low Emittance Ion Beam using the phase
 Transition by Electron Cooling
 研究代表者
 白井 敏之 (SHIRAI TOSHIYUKI)
 独立行政法人 放射線医学総合研究所・重粒子医科学センター・チームリーダー
 研究者番号：50252507

研究成果の概要：

本研究は、加速器中のイオンビームに対し、電子ビーム冷却をおこなうことにより、ビーム構造がひものように揃う相転移をおこさせ、ビームの質を飛躍的に改善しようとするものである。2007年度には、京都大学において世界で初めてその兆候をとらえた、陽子ビームの Ordering 相転移を精密に計測し、分子動力学シミュレーションとの比較検証をおこなった。2008年度には、ビーム分布を横方向に制御することにより、相転移点での粒子数を制御する実験をおこない、相転移温度周辺での挙動の変化を観測することに成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：加速器科学、ビーム物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：極小エミッタンスビーム、ビーム相転移、電子ビーム冷却

1. 研究開始当初の背景

(1) 加速器によって作り出される荷電粒子ビームの質（ビームサイズや運動量拡がりなど）を向上させる試みは、加速器開発の歴史の中で、常におこなわれてきた。近年、高エネルギー加速器開発機構の ATF リングで実現されている、ビームサイズを $10\mu\text{m}$ 程度まで細くした電子ビームは、その1つの到達点といえる。ただし、放射減衰がある電子ビームに比べ、放射減衰がないイオンビームの質を高める試みは、電子に比べ大きく遅れているのが現状である。

(2) このイオンビームの高品質化における

レイクスルーは、ビーム冷却の発明である。1960～70年代に、電子ビーム冷却と確率冷却が提案され、反陽子ビームを使ったコライダーや、重イオンビーム冷却などにおいて、大きな成功を収めた。ただし、一般にこうした冷却力は小さく、蓄積リング内のイオンビームサイズは、冷却力とイオン間のクーロン相互作用が釣り合うところで決まり、低・中間エネルギーでは、せいぜい 1mm 程度のイオンビームしか生成できなかった。

(3) イオンビームの質に関する2つめのブレークスルーが、1990年代にドイツ GSI 研究所で発見された。ロシア・ノボシビルスク研

研究所 NAP-M での先駆的な実験に触発されて、電子ビーム冷却された重イオンビームの蓄積粒子数を、3000 個程度まで減らしたところ、運動量拡がり、 10^{-6} 以下まで突然急激に減少したのである。この現象は、ビーム重心系での熱運動が十分に小さくなると、それまでは発散力であったイオン間クーロン相互作用が、一転してビームを整列させる方向にはたらき、イオンが“ヒモ”のように並んだと考えられている。この熱運動をビーム温度と定義すると、これはビーム温度の相転移といえることができる。そして 2000 年代に入って、この運動量拡がりの相転移点において、ビームサイズも $10\mu\text{m}$ 以下まで急激に減少していることを示すデータが、同じ GSI で見つかった。

(4) 2005 年に本研究代表者が所属する京都大学化学研究所において、イオン蓄積・冷却リング (S-LSR) の運転が始まり、本研究代表者を中心に、陽子ビームをもちいたビーム相転移実験をおこなった。その結果、世界で初めて 7MeV 陽子ビームの相転移の兆候を観測した。本研究は、こうした背景のもとに、この相転移現象を実用的に利用し、ビームの質の改善につなげようとするものである。

2. 研究の目的

(1) イオンビームを Ordering させて、ビームの質の向上をはかる手法が、これまでのビーム冷却と本質的に異なるのは、イオン間クーロン相互作用によるビーム発散がない状態を作り出すことができる点である。それにより、ビームの質 (ビーム温度) を決めるものは、電子ビーム冷却装置の電子温度や、加速器の製作エラーだけになり、極めて小さなエミッタンスのビームを実現できる。本研究は、こうした経緯の下に、軽イオンのビーム Ordering 現象のさらなる解明と、それをもちいた超低エミッタンスビームの生成をめざし、応用につなげようとするものである。

(2) 本申請研究の目標は、できるだけ多数の粒子をリングに蓄積した状態で、Ordering 現象をおこさせ、超低エミッタンスイオンビーム (10^{-11} p.m.rad 以下) を実現し、必要に応じてそれをリングから取り出すことである。これまでに実現されたことのない、このようなイオンビームを生成することは、ビーム自身の物理としても興味深いものであるが、それだけでなく多くの応用が考えられる。

(3) 応用研究の 1 つはナノイオンビームである。現在イオンビームを小さくコリメータで切るにより生成したマイクロビームをもちいて、照射実験が広くおこなわれている。それに対し、この Ordering したビームを、

さらに四重極電磁石で絞ることにより、 $1\mu\text{m}$ を切るナノスケールのビームをコリメータ無しで生成することができる。このナノビームを用いると、細胞照射などにおいて、さらに精度の高い照射を可能にし、新たな成果をもたらす可能性があると考えている。

3. 研究の方法

(1) 本研究には、電子ビーム冷却装置が必須であるため、主として京都大学化学研究所に設置されているイオン蓄積・冷却リング S-LSR をもちいておこなう (図 1 参照)。これを補完するために、放射線医学総合研究所に設置されている HIMAC シンクロトロンももちいる。最初のステップは、S-LSR において最初の兆候が観測された陽子ビームの Ordering 現象の精密測定をし、理論・シミュレーションと比較することである。特に、運動量拡がりだけでなく、ビームサイズの正確な測定が不可欠である

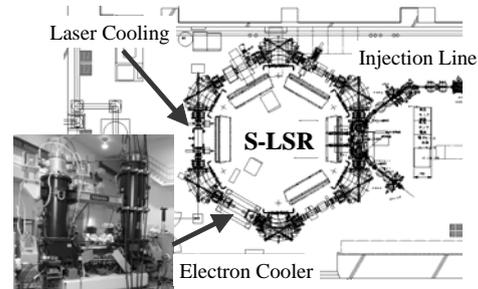


図 1 S-LSR と電子ビーム冷却装置

(2) 次のステップとしては、電子ビーム冷却パラメータの最適化と、冷却過程の制御により、Ordering をおこす粒子数を増やすことを目指す。特に、協力研究者である JINR の Smirnov 博士が提唱した、ビーム冷却過程の制御による相転移点の制御法について、重点的に研究をおこなう。これは、エネルギー広がり冷却とビームサイズ冷却の比率を変化させることで、より相転移をおこしやすくするというものである。

(3) 最終的なステップとして、Ordering によって生成した超低エミッタンスビームを速いキッカー電磁石で蹴ることにより、セプタムを通して、加速器の外側のビームラインにとりだし、外部においてナノビームの計測をおこなう。

4. 研究成果

(1) S-LSR において観測された、粒子数と運動量拡がりの相関結果を図 2 に示す。粒子数 N が多い場合は、運動量拡がりは $N^{0.29}$ に比例するが、粒子数を 2000 個程度まで減少させた時に、運動量拡がりの急激な減少が観測

された。この不連続な運動量拡がりの変化は、多価の重イオンの場合と同様に、相転移によるものと考えられ、陽子ビームにおいては、世界で初めての観測である。相転移点での運動量拡がりから、7 MeV 陽子のビーム進行方向の相転移温度は、0.17 meV (2 K) と推定される。粒子数が 1000 個から 2000 個のときには、その運動量拡がりに、ばらつきは見られるが、粒子数には依存していない。この領域での平均運動量拡がりから、進行方向のビーム温度を計算すると、26 μ eV (0.3 K) 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 μ eV) に近い値となっている。つまり、ordering により、理論的な冷却限界である電子温度近くまで、イオンビームは冷却されていると考えられる。

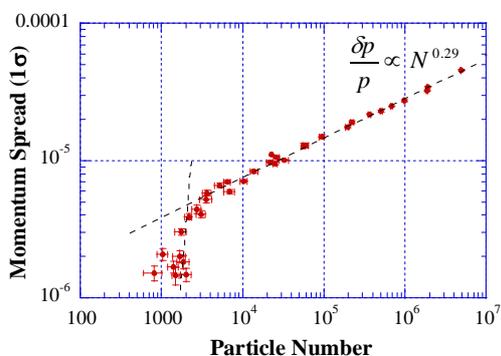


図 2 蓄積陽子数と運動量拡がりの相関。このときの電子電流は 25mA。

(2) ナノビームの形成にとって、もっとも重要であるビームサイズと蓄積粒子数の関係を図 3 に示す。これから、サイズは $N^{0.28}$ に比例することがわかる。しかし、測定の分解能不足により、運動量拡がりに相転移が見られた 2000~3000 個付近で、同様の不連続点が存在するかどうかについては、明確なデータが得られなかった。しかし、この点でのビームサイズから横方向温度を計算すると、面白いことがわかる。この横方向のイオンビーム温度は 1 meV に相当するが、横方向の電子温度は、断熱膨張による温度低下を考慮に入れても 34meV である。つまり、イオンは冷やしている電子の温度よりも 1桁以上冷やしている。これは、冷却装置内部のソレノイド磁場に、電子が巻きついて、電子の横方向運動が凍りついている効果が直接見えていると考えられる。このことは、横方向電子温度の高さが、ナノビーム実現の障害にはならないことを示唆しており、有望な結果といえる。

(3) 相転移したビームを、その構造を壊さずに加速器の外部にとりだすために、電子ビーム冷却した 7MeV 陽子ビームに RF 電圧を

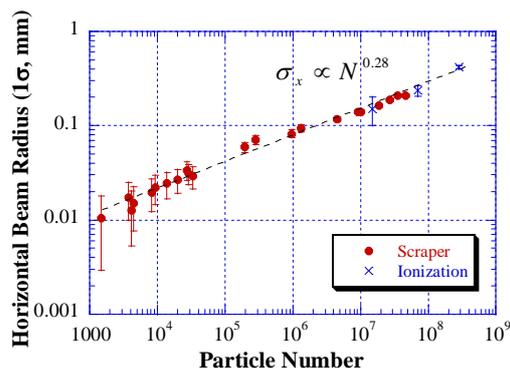


図 3 蓄積陽子数と rms ビーム半径の相関。このときの電子電流は 25mA。ほとんどのデータはスクレーパーによって測定されたが (●印)、クロスチェックのために、ビーム半径の大きい時には、残留ガスイオン化モニターでビーム半径を測定している (x印)。

印加してシンクロトロン振動させ、その 1/4 周期の近辺でパルス幅が最短になったところで速い取出しによりリングから取り出すことを試みた。これは、ナノビーム取り出しだけでなく、フリーラジカル研究のためのパルスラジオリシスへの応用にとっても有望な手法である。相転移したビームの取り出しではないが、 5×10^7 個の陽子に対して、2.4 ns の取出しビームのパルス幅が達成されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① 白井敏之 他、Electron Cooling Experiments at S-LSR, Proceedings of International Workshop on Beam Cooling and Related Topics, pp.135-139 (2009)、査読無

② 藤本 哲也、渋谷 信二、野田 耕司、白井敏之 他、Formation and fast extraction of a very short-bunched proton beam for the investigation of free radicals, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A, **588**, pp. 330-335 (2008)、査読有り

③ 白井 敏之 他、One Dimensional Beam Ordering of Protons in a Storage Ring, Physical Review Letters, **98**, pp. 204801 1-4 (2007)、査読有り

④ 白井 敏之 他、Ordering Transition of the Electron Cooled Proton Beam, Proceedings of the Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 4 pp.115-117 (2007)、査読無

〔学会発表〕(計2件)

① 白井 敏之、HIMACにおける電子ビーム冷却されたイオンビームの速い取り出し、日本加速器学会 年会、2008年8月6日、東広島市中央公民館

② 白井 敏之、電子ビーム冷却された陽子ビームの Ordering相転移、第4回 日本加速器学会 年会、2007年8月2日、和光市民文化センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白井 敏之 (SHIRAI TOSHIYUKI)
独立行政法人 放射線医学総合研究所・
重粒子医科学センター・チームリーダー
研究者番号：50252507

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

野田 章 (NODA AKIRA)
京都大学・化学研究所・教授
研究者番号 20114605

頓宮 拓 (TONGU HIROMU)
京都大学・化学研究所・技術職員
研究者番号 10397523