

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740213

研究課題名(和文) 運動量分散を制御した高速3次元レーザー冷却によるクリスタルビームの生成

研究課題名(英文) Formation of crystalline beams by means of efficient three-dimensional laser cooling through momentum dispersion

研究代表者

百合 庸介 (Yuri, Yosuke)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・研究員

研究者番号：90414565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：“クリスタルビーム”と呼ばれる、指向性や単色性が極めて高い超高品質のビームを実現するため、自主開発した分子動力学シミュレーションコードを駆使して、イオンビームのレーザー冷却に関する研究を実施した。運動量分散を介して3次元レーザー冷却を高速化する蓄積リングの運転条件を明らかにするとともに、イオンビームの3次元レーザー冷却過程や冷却ビームの特性を詳細に調べた。冷却により3次元の秩序化構造を有するビームが形成されることを見出した。

研究成果の概要(英文)：A study on laser cooling of ion beams was carried out using a molecular dynamics simulation code developed toward the realization of high-quality beams, called "crystalline beams" that have extremely high directivity and monochromaticity. Operating conditions of a storage ring to achieve a speedup of three-dimensional laser cooling were found. Then, the laser-cooling process and the characteristics of cooled beams were investigated in detail. It was demonstrated that the beam with a three-dimensional ordered configuration was formed.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙物理

キーワード：イオンビーム レーザー冷却 蓄積リング クリスタルビーム 秩序化

1. 研究開始当初の背景

蓄積リングを周回するイオンビームを強力に冷却し、構成粒子が有する熱雑音を極限まで取り除くことによって、粒子配置が秩序化し、最終的には“クリスタルビーム”と呼ばれるクーロン結晶状態が形成できることが理論的に知られている。クリスタルビームを形成するには、冷却過程において生じる粒子間クーロン相互作用に起因するビーム加熱に打ち勝ち、粒子の振動を減衰させることが必要であり、原理的な到達温度が mK レンジと最も低いレーザー冷却技術を用いてイオンの運動を 3 次元的に冷却する“3次元ビーム冷却”が必須と考えられている。

レーザー光とイオンの相互作用頻度を高められるようにレーザー光はリングの直線部に沿って入射される。このため、冷却力はビームの進行方向自由度に直接働くが、これを横方向(水平及び鉛直の2自由度)へ拡張する3次元冷却法のひとつとして、進行方向のシンクロトロン振動を横方向のベータトロン振動と結合し共鳴的に冷却する共鳴結合法が考案された。系統的なシミュレーションにより、パンチ化されたイオンビームの3次元レーザー冷却とそれによる1次元の直線状や2次元のジグザグ構造のクリスタルビームが生成可能であること示された。

しかしながら、上記の3次元冷却法が適用できるのは高周波電場でパンチ化されたビームに限られ、シンクロトロン振動に合わせてレーザーの周波数変調をゆっくりと行わなければならない。また、3自由度間の差共鳴条件を満たす動作点を選ぶ必要性から、進行方向と水平方向の結合に有用な運動量分散を自由に設定できなかつた。このような問題点のため、共鳴結合法は実際のリングの運転条件では冷却時間は長くなり、必ずしも効率的な冷却手法とは言えなかつた。

2. 研究の目的

上述のように、従来のパンチビームの共鳴結合による3次元レーザー冷却では、リングの運転条件が制約されるという問題があった。これに対して、本研究では、進行方向のレーザー冷却力を横方向へ拡張する3次元化の手段として、運動量分散が有限である場所においてレーザー光をビームに対して水平方向に変位させて照射することによる“テーパ冷却”に着目した。この方式では、従来法では必須であった、進行方向と横方向の間の差共鳴条件が不要となる。そのため、蓄積リングの運転条件をより自由に決定できることから、運動量分散を高めることで、これを介した横方向の冷却効率の向上が期待できる。シンクロトロン振動を励起するための高周波空洞を用いないため、クリスタルビームの形成や安定化に重要な、集束場の高い周期性を実現でき、より安定性の高いクリスタルビームの形成やより高強度のビームの3次元冷却による高品位化も可能となると

考えた。

そこで、本研究の目的は、運動量分散を制御した高速3次元レーザー冷却によるイオンビームの超低エミッタンス化とこれに基づいたクリスタルビームの形成とし、系統的な分子動力学(MD)シミュレーションに基づく理論的研究を行った。

3. 研究の方法

自主開発した MD シミュレーションコード“CRYSTAL”を駆使して、系統的なシミュレーションを行った。このコードは、蓄積リング内を周回するイオンの集団運動を精度良く追跡するため、種々の電磁石の磁場や配置を正確に模擬できるばかりでなく、進行方向の粒子分布に周期的境界条件を導入すること等によって粒子間クーロン相互作用を効率的に計算することが可能である。さらに、レーザー冷却過程でのビームの振る舞いを追跡するため、イオンとレーザー光の確率的な相互作用を取り込むことができるという機能も有する。

シミュレーションのベースには、京都大学の小型イオン冷却蓄積リング“S-LSR”(図1参照)を主として用いた。このリングは6回の高い対称性を持ち、冷却ビームの共鳴不安定化を避けるために必要な、単位周期あたりのベータトロンチューンを低くできるという特長を有しており、超低エミッタンスビームやクリスタルビームの生成を目指してレーザー冷却実験が行われている。

系統的な MD シミュレーションにより、イオンビームのレーザー冷却過程や冷却後ビームの特性を、蓄積リングやレーザーの様々なパラメータに着目して詳しく調べた。

4. 研究成果

(1) 3次元レーザー冷却

シミュレーションでは、まず3次元レーザー冷却のパラメータを検討した。S-LSRの電磁石配置を想定し、ベータトロンチューンは、上述の安定性条件を満たす1.44、1.60、1.90の計3点の動作点を選択した。リングを周回する40keVの $^{24}\text{Mg}^+$ イオンの連続ビームに理想的な冷却力を作用させ、動作点や強度に応

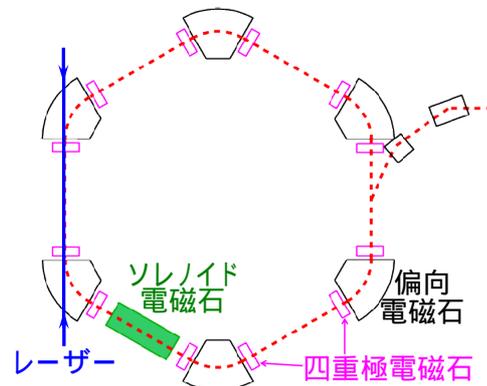


図1：蓄積リング S-LSR の模式図。リングの周長は 22.56m である。

じて様々な構造のクリスタルビームが理論に従って形成できることを確認し、動作点等の想定した条件に問題がないことを確かめた。

次に、テーパ冷却を単純化した線形の冷却力でビームの進行方向自由度を冷却することにより、運動量分散を通じて水平方向が間接的に冷却されることを確認した。水平方向の冷却速度はテーパ化の度合いを表すテーパ係数によって決まるが、ここではレーザー冷却の典型的なパラメータである、スポットサイズ (5mm)、レーザー光軸の水平方向変位 (2~3mm)、離調 (-10MHz オーダー) によって実現されるものと同程度である 0.01 オーダーの値とした。さらに、磁場強度が数 10G の弱いソレノイド電磁石を励磁することにより、集束場の高い周期性を十分維持したまま、冷却効果が鉛直方向自由度にも拡張され、冷却力が 3次元化されることが分かった。このようにして、リングの動作点や冷却力の 3次元化のための基礎パラメータを確定した。なお、多次元のクリスタルビームを形成するには、冷却後の平衡状態で粒子の水平方向位置に依存した進行方向運動量を持たせなければならず、S-LSR では 0.3~0.4 のテーパ係数が必要である。したがって、テーパ係数が小さい現在の冷却条件では 3次元冷却は行えるが、クリスタルビームを形成することはできなかった。

このようにして設定したリングの運転条件を基に、レーザーパラメータを具体的に取り入れた冷却シミュレーションを行った。レーザーの主な条件は、理論解析と予備的なトラッキングシミュレーションにより、次のように設定した。出力 100mW で 5mm のスポットサイズに集光したレーザー光 2本を図 1 に示すようにリング内の 1ヶ所の直線部分に対向して入射し、テーパ冷却のために光軸を水平方向に互いに反対方向に 3mm シフトさせた。また、2本のレーザーの周波数については、S-LSR で実測された $\pm 7 \times 10^4$ の進行方向運動量のばらつきを有するビーム全体を冷却できるように初期の離調は -4.2GHz とし、Mg イオンのレーザー冷却準位の自然幅と同程度である -10MHz のオーダーまで掃引した。初期の規格化エミッタンスも実測に合わせて、 $1 \times 10^{-9} \text{m}\cdot\text{rad}$ とした。3方向の初期ビーム温度は、いずれも数 100K に相当する。

このビームに対するレーザー冷却による捕獲効率 (レーザー冷却される粒子数の入射粒子数に対する割合) の周波数の掃引時間に対する関係を調べた結果、わずか 1000 ターン (約 40ms) の掃引時間で 95% 以上の高い捕獲効率で冷却できること、すなわち、バンチビームの共鳴結合の場合と比べて、数~数 10 倍程度の高速な進行方向冷却が可能であることが示された。逆に言えば、バンチビームの共鳴結合の場合、同じ短時間で周波数を掃引すると捕獲効率が大きく低下すること

を示している。図 2 に示すように、冷却後の運動量の広がりには 2×10^{-6} 以下にまで縮小されている。温度に変換すると 3mK であり、 $^{24}\text{Mg}^+$ イオンのドップラー冷却限界に近い。

他方、横方向の冷却は、バンチビームの共鳴結合法では進行方向自由度と同時に進むのに対し、本テーパ冷却法では図 2 に示すように、周波数掃引の完了後に加速する。これは、レーザーの離調の絶対値が小さいほど、横方向の冷却速度が増すという理論解析結果に一致している。ただし、掃引後の離調が小さすぎると、ドップラーレーザー冷却の原理から予測されるように、拡散による加熱の影響で到達温度が高まるとともに、捕獲効率が低下する。適切な離調はビーム強度にもよるが、上述の条件の場合、-80~-40MHz 程度であることを明らかにした。到達エミッタンスは、後述する 1次元クリスタルビームが形成されるような低ビーム強度では、 $10^{-13} \text{m}\cdot\text{rad}$ オーダーであった。これは 0.1K オーダーの極低温である。

続いて、横方向冷却効率の運動量分散に対する依存性を調べた。運動量分散の値は、ベータトロンチューンの動作点を変えることで変化させた。チューンを 1.44 から 1.90 に増加させると、冷却セクションの運動量分散の平均値は 2.1m から 1.4m に減少する。前者の場合、掃引完了後約 2000 ターン (約 80ms) で、後者の場合は約 5000 ターン (約 200ms) でそれぞれエミッタンスは平衡に達した。このように運動量分散が小さくなるほど、冷却

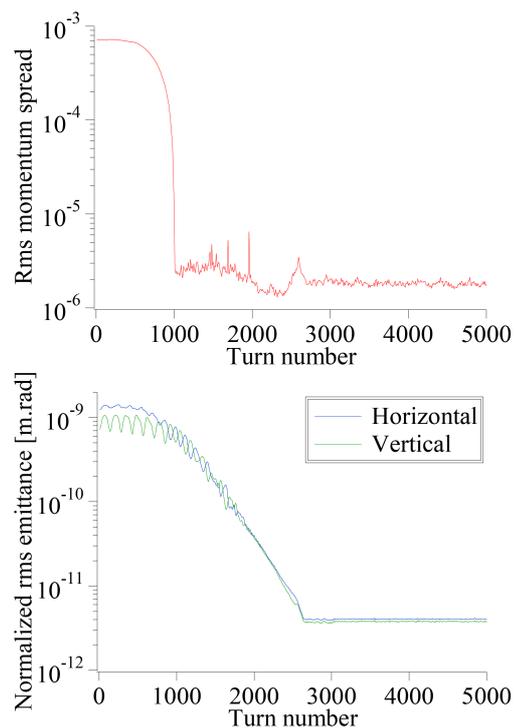


図 2: 2本のレーザーを用いたテーパ冷却における進行方向運動量広がり及び横方向エミッタンスの時間発展。ビームの線密度は $4 \times 10^4 \text{ions/m}$ であり、レーザーの離調は 1000 ターンで -61MHz まで掃引した。

速度が低下することが観測されたが、冷却速度は運動量分散に比例するという既存の理論とは十分に一致しなかった。理論では空間電荷効果が考慮されておらず、進行方向が先に mK レンジまで冷却され粒子間相互作用が顕著であり、横方向との温度差が大きいシミュレーションの状況とは異なるためと考えられる。また、チューンが 1.90 の場合、冷却効率が低下したことにより、平衡エミッタンスは 3 倍程度高かった。

以上より、S-LSR において、レーザー光軸をシフトさせることによる運動量分散を通じた 3 次元冷却の結果、数 100K の初期ビームをわずか 0.1s あまりの短時間で、0.1K オーダーへの極低温化が実現できることを系統的なシミュレーションにより示した。

(2) クリスタルビームの形成

続いて、前節の 3 次元レーザー冷却によって生成された極低温ビームのエミッタンスや粒子配置等を解析し、クリスタルビームの形成について調べた。

線密度が 1m あたり数千個以下という比較的低いビーム強度において、冷却完了後に、進行方向にほぼ等間隔に整列したまリングを安定に周回する 1 次元のクリスタルビームが形成された。ベータトロンチューンが 1.44 の場合、その閾線密度は 5×10^3 ions/m であった。同様に他のチューンでも 1 次元クリスタルビームが形成できることを確かめた。閾値を超える高密度においては、初めに行った理想的な冷却力を付与した場合のシミュレーション結果から、2 次元もしくは 3 次元構造のクリスタルビームが形成されると考えられるが、上述したように本シミュレーションで想定した 2 本のレーザーによる冷却では、テーパ係数が小さいため、多次元のクリスタルビームを形成することはできなかった。

(3) 3 次元秩序化ビームの形成

2 本のレーザー光軸をずらすことによるテーパ冷却では、理想的な多次元構造のクリスタルビームを形成するには冷却力は不十分であったが、1 次元結晶が形成された線密度よりも 1 桁高い密度においても、依然として 10^{-12} m·rad オーダーの低い平衡エミッタンスが実現されており、ランダムな粒子間クーロン散乱は抑制されているように見える。そこで、そのような平衡状態にあるビームにおいて状態変化が起きている可能性に着目し、線密度及びレーザーの離調や光軸の変位量等を変え、冷却後ビームの特性を調べた。

その結果、条件によって 3 次元的に規則的に粒子が配置する秩序化構造が形成されることを見出した。図 3 に示すように、実空間配置は 3 次元クリスタルビームのそれに似ているが、位相空間内の粒子配置は、クリスタルビームの場合には直線状に並ぶのに対して、平面的に (図 3 (c) では六角形で) 広が

っている。つまり、この秩序化ビームは、クリスタルビームとは異なる定常状態にあると言える。このビームの構造を詳細に調べた結果、個々の粒子のベータトロン振動は完全には抑制されておらず、相対的な位置関係をほぼ維持したまま、らせん状に回転しながら、リングを安定に周回することが分かった。このような 3 次元秩序化ビームが形成されるのは、粒子間のクーロン斥力と電磁石からの集束力及び冷却力がバランスし、なおかつ、個々の粒子の閉軌道長の差がらせん状運動によって相殺されることによるものと考えられる。

イオンビームの秩序化については、電子冷却された 10^2 ions/m 程度以下の超低線密度のビームにおいて、進行方向で隣り合うイオンが互いを追い越すことがないという 1 次元秩序化状態がいくつかのグループによって実験的に達成されている。本研究で見出されたレーザー冷却による 3 次元のビーム秩序化は、3 次元結晶化実現への前段階になると考えられる。

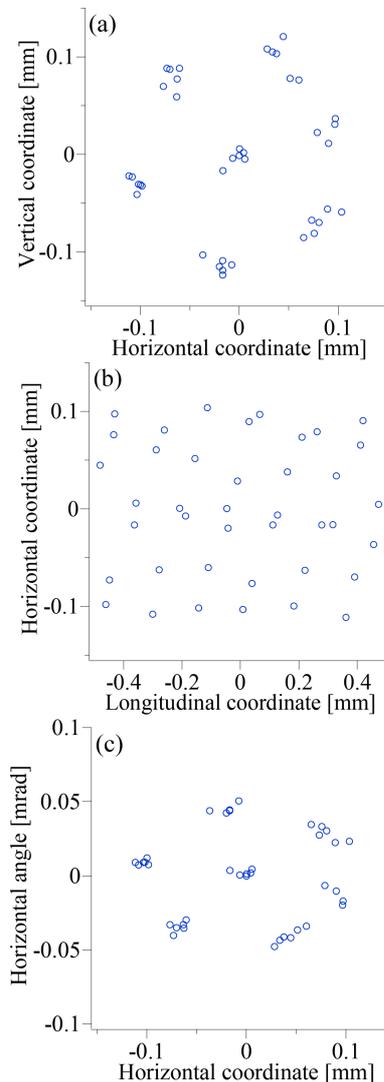


図 3 : 3 次元秩序化ビームの実空間及び位相空間分布。

(4)レーザー冷却実験の検証

前述のレーザー冷却シミュレーションでは、典型的かつ理想的なレーザーパラメータを想定したが、実際に S-LSR で行われた冷却実験では、レーザーは 1 台であり、長時間安定に稼働させるため、出力は 10mW 程度に限られ、周波数（離調）は固定されていた。このような限られたレーザーの性能及び実際のリングの運転条件を考慮して、到達可能なエミッタンスやビーム結晶化の可能性をシミュレーションにより調べた。

共鳴結合法に基づく 3 次元レーザー冷却シミュレーションの結果、上述のように限られたレーザー冷却条件にもかかわらず、3 秒間にわたる長時間の冷却により、-200MHz の大きな離調であっても、入射イオンを約 70% の捕獲効率でビームを 3 次元的に冷却することができた。リング内の全粒子数が約 1 万個（すなわち、1 バンチあたり約 100 個）の強度では、到達エミッタンスは 10^{-11} m·rad のオーダーであり、S-LSR での実験結果とよく一致した。開発した MD シミュレーションコードによって、実験で達成されたビームの状態を再現することができた。このことから、ビーム強度を 1 桁下げ、離調を -10MHz オーダーへ小さくすることで、1 次元のクリスタルビームの形成が示唆され、これを実現するための今後の実験の指針（ビームの低強度化及びその観測手法の開発）を明らかにした。さらには、テーパ冷却による高速 3 次元冷却やそれによる秩序化ビームの形成が期待される。

(5)まとめ

蓄積リングを周回する重イオンビームの 3 次元レーザー冷却に関するシミュレーション研究を行った。レーザー光軸を水平方向にずらす手法によって運動量分散を介して 3 次元冷却を高速化でき、1 次元クリスタルビームが形成できることを系統的に明らかにし、研究の目標を達成した。さらなる成果として、3 次元レーザー冷却の結果、クリスタルビームとは異なる特性を持つ 3 次元秩序化ビームが形成できることを明らかにした。

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 14 件)

Y. Yuri, Molecular Dynamics Simulation of the Three-Dimensional Ordered State in Laser-Cooled Heavy-Ion Beams, JPS Conference Proceedings, 1 (2014) 013014. 査読有

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.1.013014>

Y. Yuri, Simulation Study on Transverse Laser Cooling and Ordering of Heavy-Ion Beams in a Storage Ring, Proceedings of the North

American Particle Accelerator Conference, NA-PAC'13, p. 1434. 査読無

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/pac2013/>

Y. Yuri, K. Osaki, H. Okamoto, Z. He, H. Souda, A. Noda, M. Nakao, H. Tongu, and K. Jimbo, Simulation Study on Transverse Laser Cooling and Crystallization of Heavy-Ion Beams at the Cooler Storage Ring S-LSR, Proceedings of the International Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL'13, p. 162. 査読無

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/cool2013/>

H. Souda, M. Nakao, H. Tongu, K. Jimbo, K. Osaki, H. Okamoto, Y. Yuri, H. Zhengqi, M. Grieser, and A. Noda, Efficiency Enhancement of Indirect Transverse Laser Cooling with Synchro-Betatron Resonant Coupling by Suppression of Beam Intensity, Japanese Journal of Applied Physics 52 (2013) 030202. 査読有

<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.030202>

〔学会発表〕(計 5 件)

Y. Yuri, Molecular Dynamics Simulation of the Three-Dimensional Ordered State in Laser-Cooled Heavy-Ion Beams, 12th Asia Pacific Physics Conference, 2013 年 7 月 14 ~ 19 日、千葉市、幕張メッセ

Y. Yuri, Simulation Study on Three-dimensional Laser Cooling of Ion Beams and Characteristics of the Cooled Beams, 3rd International Particle Accelerator Conference, IPAC'12, 2012 年 5 月 20 ~ 25 日、米国ニューオーリンズ

6 . 研究組織

(1)研究代表者

百合 庸介 (YURI Yosuke)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・研究員

研究者番号：90414565