

平成22年6月7日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19740152

研究課題名(和文)

無分散リングにおける3次元レーザー冷却によるビーム結晶化と引き出しに関する研究

研究課題名(英文) Study on beam crystallization by three-dimensional laser cooling in a dispersion-free storage ring and extraction of crystalline beams

研究代表者

百合 庸介 (YOSUKE YURI)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部・研究員

研究者番号：90414565

研究成果の概要(和文)：究極の超高品位荷電粒子ビームであるクリスタルビームを実現するため、分子動力学シミュレーションを駆使し、運動量分散のない蓄積リングにおける3次元レーザー冷却法を用いたクリスタルビームの生成手法を探るとともに、広範な温度領域におけるイオンビームの加熱率を種々の条件で評価しクリスタルビーム実現のための物理的条件を明らかにした。また、リングから引き出したクリスタルビームの安定な輸送のための条件を解明した。

研究成果の概要(英文)：In order to realize an extremely high-quality charged-particle beam, “crystalline beam”, a formation method of crystalline beams by means of three-dimensional laser cooling in a dispersion-free storage ring has been explored using the molecular dynamics simulation technique. The beam heating due to Coulomb interactions, which can be an obstacle to beam cooling, has been evaluated over a wide temperature range to clarify the conditions of a storage ring and beams for beam crystallization. A physical condition has been also found for stable transportation of crystalline beams extracted from a ring.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,600,000	510,000	3,110,000

研究分野：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：クリスタルビーム、ビーム冷却、レーザー冷却、イオンビーム、蓄積リング、空間電荷効果

## 1. 研究開始当初の背景

蓄積リングを高速で周回する荷電粒子ビームを冷却すると、ビームの占有する位相空間体積(エミッタンス)の密度を高め高品質

化することができる。レーザー冷却に代表される強力なビーム冷却技術を用いてイオンビームを極限まで冷却することで、極低温状態でビームはクーロン結晶化することが理

論的に予測されている。結晶化したビームはクリスタルビームと称され、超高品位ビームとして注目され、その基礎物性や生成法が研究されてきた。

1990年代からの精力的な理論研究により、クリスタルビームを形成するために蓄積リングやビームが満たすべき条件がいくつか明らかになっている。その中で、これまでクリスタルビームの実現を阻害してきた最も大きな要因のひとつが蓄積リングが運動量分散を持つことである。クリスタルビームを生成し維持するためには、その特性上、全粒子の周回周期が一致しなければならない。一方で、個々の粒子の閉軌道長は周回半径方向外側ほど大きい。すなわち、運動量分散が存在する通常のリングでは、クリスタルビームを構成する個々の粒子は水平方向外側ほどわずかに大きな速度で周回しなければならない。通常のビーム冷却法は、個々の粒子の速度を揃えようとするので、このような特殊なビーム状態をつくり出すことは極めて困難である。

この課題を克服するひとつの方法として、電場と磁場を組み合わせることでビームを偏向する運動量分散のない新しい蓄積リングが提案された。このリングでは、個々の粒子は偏向の際に半径方向位置に応じて電場により自動的に加減速されるため、上のような特殊な状態を作ることなく、クリスタルビームを形成することが理論上可能である。

また、クリスタルビームの生成を阻害する別の要因として、冷却過程でのビーム体積密度の増加に起因するイントラビーム散乱によるビーム加熱がある。クリスタルビームを生成するには、これを上回る効率でビームを冷却する必要があるが、加熱率のリングやビームパラメータに対する依存性の詳細は不明であった。さらに、生成されたクリスタルビームをリングからビーム輸送系へ引き出す際の条件やビーム安定性についても知られていなかった。

## 2. 研究の目的

ビーム結晶化の実現に向けて、本研究ではクリスタルビームの生成、安定化および輸送の具体的な手法や物理的条件を、分子動力学シミュレーションを駆使し明らかにすることである。

生成については無分散リングの可能性に着目し3次元レーザー冷却法を用いたクリスタルビーム生成の具体的な手法を確立する。また、生成や安定化のためにイントラビーム散乱によるビーム加熱現象のパラメータ依存性を明らかにするとともに、クリスタルビームの安定な輸送のための物理的条件を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) コードの高速化

本研究では、イオンビームの粒子間クーロン相互作用や冷却用レーザー光子との確率的な相互作用を厳密に考慮する必要があるが、これらの計算には膨大な時間を要する。そこで、数値計算専用的高速ワークステーションを整備するとともに、自作の分子動力学シミュレーションコード“CRYSTAL”を並列化し、シミュレーションの効率化を図った。スカラチューニングと並列化により、デュアルコアのマシンの最高で従来の約1.9倍に高速化された。

### (2) リングとイオン種の決定

蓄積リングのラティス構造は、レーザー冷却実験を行っている京都大学の“S-LSR”および単純なFODOラティスから成る仮想的なリングをいくつか想定した。

イオン種はレーザー冷却が可能な数10~100keV程度の運動エネルギーを持つ $24\text{Mg}^+$ イオンを想定した。

ビームは初期的に $1\text{e-}8\text{m. rad}$ オーダーの規格化二乗平均エミッタンスおよび $1\text{e-}3$ オーダーの運動量幅（いずれも温度に換算すると数万K）を有し十分に高温状態にあると仮定した。

想定したリングにおいて、運動量分散の有無によらず様々なクリスタルビームが生成できること確認するため、レーザー冷却力をモデル化した冷却法によりチューンや線密度等の異なる様々な条件下で冷却シミュレーションを行った。

### (3) 無分散リングでの3次元レーザー冷却

#### ① 結合力の最適化

レーザーはリングの直線部にビームに平行に照射する。直接的に縦方向にのみ働く冷却力を横方向へ拡張する必要がある。そこで3自由度の運動を十分に結合させるため、ソレノイド磁場および結合空洞電場の強度を変えてモデル化した冷却力により冷却シミュレーションを行った。

#### ② レーザー冷却力の最適化

使用するコードCRYSTALは、イオンとレーザー光子の確率的な相互作用を極めて正確に模擬できる。3自由度の結合が最適化された状態で、冷却開始時および終了時のレーザー周波数、その変調速度、スポットサイズ等のレーザー冷却の条件を最適化した。

#### ③ ビーム強度依存性

粒子数を数個から数100個まで変化させ冷却シミュレーションを行った。

#### ④ 冷却されたビームの安定性

レーザー冷却完了後のビームの安定性を確認するため、レーザー冷却を停止しビームの状態をモニタした。

#### (4) イントラビーム散乱による加熱率の評価

通常の高温状態から結晶化する超低温状態までの広範囲にわたってイントラビーム散乱によるビーム加熱率を評価した。モデル化した冷却法で様々な結晶状態をつくり、それにランダムな摂動を与え、ビームが加熱されエミッタンスが自然に増加する状況をモニタした。ラティス構造、チューン、ビーム電流、イオン種、価数、エネルギーに対する依存性を調べた。加熱率は1ラティス周期あたりのエミッタンスの増加率として定義した。

#### (5) クリスタルビームの取り出しと輸送

静電場によるビーム偏向を模擬するため、コードに改良を加えた。電場および磁場による引き出しのクリスタルビームへの影響の違いを比較した。仮想的なビーム輸送系(全長7.8m)を想定し、ベータatron振動の位相進度を90~300度にわたって変え、輸送した。

### 4. 研究成果

#### (1) 無分散リングでの3次元レーザー冷却

##### ① 結合力の最適化

ビーム結晶化するには、縦方向の強力なレーザー冷却力を横方向自由度へも拡張しなければならない。そのため、無分散リングにおいて3自由度で十分に結合させるため、縦一横方向の結合には結合空洞を、水平一鉛直方向の結合にはソレノイド電磁石を想定した。S-LSRを40keVの運動エネルギーで周回する $^{24}\text{Mg}^+$ イオンビームの場合、3方向の冷却効率を均等化するには、およそ350Gのソレノイド磁場、および、1kV/mの結合空洞電場が必要であることが分かった。想定した高周波の駆動周波数は2.5MHzである。これらは十分に実現可能な値である。

##### ② レーザー冷却の最適化

次に、レーザー冷却力の最適化を行った。初期温度が数万Kのビームの横方向のエンベロープ半径は約5mm、運動量幅は0.1%のオーダーである。このとき縦方向の粒子分布は高周波バケツよりも大きい、これを十分にカバーできるよう、イオンビームに対向および並行するレーザーを各1本ずつ計2本想定し、初期の周波数離調は10GHzとした。波長はおよそ280nmである。レーザーのスポット半径は1cmで、 $^{24}\text{Mg}^+$ イオンの飽和強度と同程度の集光強度を持つものとした。

冷却過程においてイオンがレーザーの捕獲領域から外れロスすることのないよう、レ

ーザー周波数のスキャンを十分ゆっくり行う必要がある。この速度はシンクロトロンチューンが大きいほど小さくする必要があることがわかった。0.07のシンクロトロンチューンの場合、およそ2秒間であった。

掃引後のレーザー周波数離調の最適値はドップラー限界を与える理論値よりも3倍程度大きいことも分かった。

##### ③ 冷却ビームの特性

ビーム電流が十分低い場合、レーザースキャン完了後には規格化エミッタンスは $1e-12\text{m. rad}$ へ、運動量幅は $1e-6$ へと減少した(図1参照)。このとき、粒子が直線状に規則的に配列する1次元結晶構造が形成されるのを確認した。結晶化したビーム全体が結合空洞電場により誘起されるhead-tail振動を行っていることが分かった。この電場を弱めることでさらに50%程度エミッタンスを減少することができることも確認した。レーザー冷却を停止しても結晶状態が安定に維持することも可能であった。

ビーム電流を高くするほど到達エミッタンスは高くなる。S-LSRの無分散状態では、クリスタルビームの維持条件を満たすことができないため、大電流での結晶化はできなかったが、 $1e-11\text{m. rad}$ オーダーの規格化エミッタンスを持つかつてない高品質ビームを得られる可能性が示唆された。

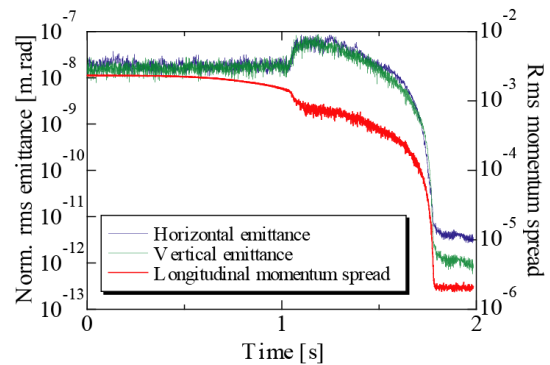


図1：無分散リングにおける3次元レーザー冷却によるエミッタンスと運動量広がり の時間発展。冷却開始から1.8秒でレーザー周波数を10GHz掃引した。

##### ④ 集束場の周期性について

共鳴結合法を適用するにはビームは高周波でバンチされていなければならないが、高周波空洞の導入により冷却ビームの安定化に必要な外部集束場の周期性は低下する。このため、無分散リングであっても線密度が十分低くない限り、極低エミッタンス状態のビームは不安定であることが分かった。他方、集束場の高い周期性が維持されるよう空洞を周期的に導入することも理論上可能

だが、共鳴結合に必要な差共鳴条件が満たされなくなるため3次元冷却はほとんど不可能であった。

#### (4) イントラビーム散乱による加熱率の評価

通常の高熱状態では、イントラビーム散乱の理論に予測されるとおり、ビーム温度が高いほど加熱率が小さくなることを確認した。より低いエミッタンスほど加熱率は増加し、比較的低温領域で加熱率が極大となり、その後は減少へ転じることが判明した。ビームが結晶化するようなさらに低エミッタンスの領域では、加熱率は極めて小さく、エミッタンスが小さいほど加熱率は低下する。つまり、粒子配置が規則的なためランダムなクーロン散乱は抑制され、極めて安定に結晶状態が保たれることが分かった。

このような加熱率の振る舞いのビームや蓄積リングのパラメータ依存性を系統的に調べた。ビーム電流が高いほど、エネルギーが低いほど、イオンの質量数が小さいほど、価数が大きいほど、加熱率のピーク位置は高エミッタンス側へ移動することが分かった。ところが、ピークの高さは、いずれの場合にも（ただし、電流が十分低い場合を除く）一定で、チューンにのみ依存することが分かった。結晶化を目指す冷却蓄積リングでは、イントラビーム散乱による加熱率を抑えるためベータトロンチューンを小さくするのが望ましい。さらに、クリスタルビームを安定に維持するには、四重極電磁石の励磁誤差を0.1%オーダー以下に抑える必要があることも分かった。

ビームの状態をエミッタンスの代わりにクーロン結合定数を用いて表わすと、加熱率が極大となるのは、上述のパラメータによらずビームが気体相から液体相へ移る付近であることを見出した（図2参照）。

以上の結果より、ビームとリングの条件が決まれば加熱率の最大値が推定できるため、イントラビーム散乱を抑えた蓄積リングやビームを結晶化するのに必要な冷却装置の設計に役立つ。

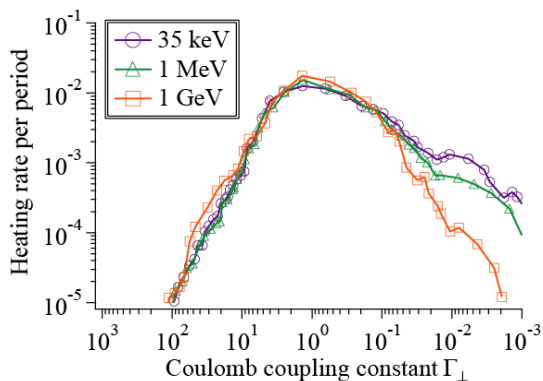


図2： $^{24}\text{Mg}^+$ イオンビームの加熱率のエネルギー依存性。線密度やチューン等他の条件は固定されている。

#### (5) クリスタルビームの取り出しと輸送

一般的なマルチターン引き出しでは結晶構造を維持できないため、バンチ全体を一度に引き出すシングルターン引き出し方法を想定した。

リング内で周期的な集束力を受けて安定に周回しているクリスタルビームを引き出すと、引き出し装置とその後の輸送系の非周期的な集束力のため、不可避免的にエミッタンスが増加することが分かった（図3参照）。ターゲットまでの輸送系のベータトロン振動の位相進度を小さいほど、エミッタンスの増大が抑えられ、クリスタルビームの維持条件と同様に127度以下の位相進度では、大電流時に形成可能な3次元結晶構造を維持できることが分かった。なお、このためには、引き出しの際の曲げ角を小さくするのが有効であることも判明した。引き出しを電場または磁場で行うことによる有意な差は見られなかった。

他方、ビーム電流が十分低い場合に形成される1次元の結晶構造は、エミッタンスが増加するものの位相進度によらず安定に輸送できた。

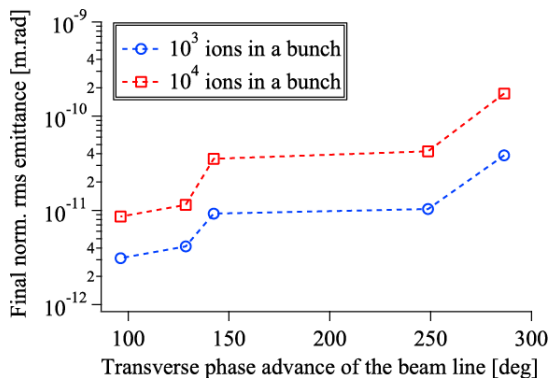


図3：クリスタルビーム引き出しにおけるエミッタンスの輸送系ベータトロン位相進度依存性。引き出す前のリング内での平均エミッタンスは $1\text{e-}13\text{m. rad}$ オーダーである。

#### 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9件)

① Y. Yuri, “Molecular Dynamics Simulation of Crystalline Beams Extracted from a Storage Ring”, Proceedings of the 10th International Computational Accelerator Physics Conference (ICAP09), 査読無 (掲載決定), THPsc061.

- ②H. Okamoto, H. Sugimoto, Y. Yuri, M. Ikegami, J. Wei, “Modeling of Ultra-Cold and Crystalline Ion Beams”, Proceedings of the 10th International Computational Accelerator Physics Conference (ICAP09), 査読無 (掲載決定), TH1I0pk02.
- ③J. Wei, P. Yu, H. Okamoto, Y. Yuri, X.-P. Li, and A. M. Sessler, “Status and Challenges in Beam Crystallization”, Proceedings of the Workshop on beam cooling and related topics (COOL09), 査読無 (掲載決定), TUA2MCI001.
- ④Y. Yuri, H. Okamoto, and H. Sugimoto, “Simulation Study of Emittance Growth from Coulomb Collisions in Low-Temperature Ion Beams”, Journal of Physical Society of Japan, 査読有, Vol.78, 2009, 124501-1~124501-10.
- ⑤H. Okamoto, H. Sugimoto, and Y. Yuri, “Coulomb Coupling and Heating of Charged Particle Beams in the Presence of Dispersion”, Journal of Plasma Fusion Research, 査読有, Vol.8, 2009, pp.950-954.
- ⑥H. Sugimoto, H. Okamoto, J. Wei, Y. Yuri, A. M. Sessler, “On the Stability of High-Energy Crystalline Beams”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 査読無, 2008, pp.436-438.
- ⑦Y. Yuri and H. Okamoto, “Heating Rate of Highly Space-charge-dominated Ion Beams in a Storage Ring”, Proceedings of the 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC08), 査読無, 2008, pp.3077-3079.
- ⑧J. Wei, H. Okamoto, H. Sugimoto, Y. Yuri, A. M. Sessler, “High-Energy Colliding Crystals - A Theoretical Study”, Proceedings of the Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL07), 査読無, 2007, pp.91-95.
- ⑨T. Shirai, M. Tanabe, H. Souda, M. Ikegami, S. Fujimoto, H. Tongu, A. Noda, K. Noda, S. Shibuya, T. Fujimoto, S. Iwata, H. Okamoto, Y. Yuri, M. Grieser, H. Fadil, E. Syresin, I. A. Seleznev, A. Smirnov, I. Meshkov, “Beam Cooling Experiments at Ion Storage Ring, S-LSR”, Proceedings of the 9th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 査読無, 2007, pp.19-22.

[学会発表] (計7件)

- ① Y. Yuri, “Molecular Dynamics Simulation of Crystalline Beams Extracted from a Storage Ring”, 10th International

Computational Accelerator Physics Conference (ICAP09), 2009年9月3日, Mark Hopkins Intercontinental Hotel (米国、サンフランシスコ) .

②H. Okamoto, “Modeling of Ultra-Cold and Crystalline Ion Beams”, 10th International Computational Accelerator Physics Conference (ICAP09), 2009年9月3日, Mark Hopkins Intercontinental Hotel (米国、サンフランシスコ) .

③J. Wei, “Status and Challenges in Beam Crystallization”, Workshop on beam cooling and related topics (COOL09), 2009年9月1日, Ning-Wo-Zhuang Hotel (中国、蘭州) .

④Y. Yuri, “Coulomb Coupling and Heating of Charged Particle Beams in the Presence of Dispersion”, 14th International Congress on Plasma Physics (ICPP2008), 2008年9月11日, 福岡国際会議場(福岡県福岡市) .

⑤杉本寛, “高エネルギー結晶化ビームの安定性について”, 第5回日本加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会, 2008年8月6日, 東広島市中央公民館 (広島県東広島市) .

⑥ Y. Yuri, “Heating Rate of Highly Space-charge-dominated Ion Beams in a Storage Ring”, 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC08), 2008年6月26日, Magazzini del Cotone (イタリア、ジェノバ) .

⑦百合庸介, “超低エミッタンスイオンビームのエミッタンス増加率”, 日本物理学会2007年年次大会, 2007年9月21日, 北海道大学 (北海道札幌市) .

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

百合 庸介 (YOSUKE YURI)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構  
放射線高度利用施設部

研究者番号: 90414565

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: