

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400299

研究課題名(和文) 極低温イオンビームの新奇秩序化状態の解明とクリスタルビームの生成に関する研究

研究課題名(英文) Study on the clarification of a Coulomb ordered state of ultralow-temperature ion beams and the formation of crystalline beams

研究代表者

百合 庸介 (Yuri, Yosuke)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・主幹研究員

研究者番号：90414565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：蓄積リングを周回するイオンビームを強くレーザー冷却することで形成可能な“秩序化ビーム”の特性を分子動力学シミュレーションにより調べた。規則的に配置した構成粒子の位相空間分布や運動の様子およびこれらのリングやビーム条件に対する依存性等、様々なビーム力学的特性を明らかにした。また、秩序化ビームの規則的な断面構造を計測する手法の可能性を探るため、ラジオクロミックフィルムを用いる手法を検討した。マイクロビーム照射実験により、フィルムは数 μm の空間分解能を有することが分かった。原理的には、断面構造として数百 μm の直径で数十 μm の間隙を持つ秩序化ビームの測定は可能と考えられる。

研究成果の概要(英文)：Characteristics of an ordered beam, which can be formed by applying strong laser cooling to ion beams circulating in a storage ring, were investigated using molecular dynamics simulations. Various dynamic behaviors were found such as the phase-space distribution and systematic oscillation of constituent ions in the ordered configuration, and their dependences on ring and beam conditions. Moreover, the possibility of a simple profile measurement method using radiochromic films was considered toward measuring the cross-sectional structure of the ordered beam. It was found, through a microbeam irradiation experiment, that the radiochromic film has sufficiently a high spatial resolution of a few microns. The present result indicates that it is, in principle, possible to measure the cross-sectional structure of an ordered beam, which typically has a diameter of several hundred microns with inter-particle spacing of several ten microns.

研究分野：ビーム物理

キーワード：ビーム冷却 イオンビーム レーザー冷却 秩序化 クリスタルビーム ラジオクロミックフィルム

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冷却することにより、構成粒子の熱振動(ベータトロンおよびシンクロトロン振動)を取り除き、ビームを高品質化(低エミッタンス化)することが可能である。特に、適切な条件下で、ビームを3次元的に強く冷却することによって、そのエミッタンスをほぼゼロに縮小し、個々の粒子が規則的に配置した結晶化ビーム(クリスタルビーム)が生成できることが理論的に知られている。

このような究極なビームの実現には、到達限界温度が mK オーダーであるレーザー冷却法が最も有効な手段と考えられている。1990年代以降イオンビームのレーザー実験が行われ、縦方向の1次元のみながら 1mK のビーム温度が達成された。しかし、後に冷却ビームの安定性に関してリング設計に問題があることが判明し、横方向を十分に冷却することには成功しておらず、ビーム結晶化は未だ実現されていない。一方、レーザーパラメータを考慮した分子動力学(MD)シミュレーション研究によれば、適切に設計されたリングではイオンビームを3次元的にレーザー冷却することが可能であり、低線密度において、1次元(直線状)および2次元(平面状)構造を有する結晶化ビームが形成可能であることが予測されている。しかしながら、安定な結晶化ビームを生成するには、極低エミッタンス状態での運動量分散効果の精密な制御(構成粒子がリングを周回する際の平均角速度をそろえること)が要求されることから、レーザー冷却による3次元結晶化ビームの形成は非常に困難であると考えられている。

さらに最近のMDシミュレーションにより、理論上3次元結晶が生成可能な比較的高い線密度のビームに対して3次元レーザー冷却を適用することによって、個々の粒子が規則的に配置し運動する、ある種の秩序化状態が生成されることが示された。この新奇な秩序化状態は、結晶化ビームとは似た実空間構造を有するものの、質的には異なっている。この秩序化状態は3次元結晶化の前段階にあるものと期待される。ビーム結晶化を実現するための足がかりとしても、秩序化ビームの特性を十分に明らかにしておく必要がある。

実験的には、京都大学の小型蓄積リング S-LSR において、ビーム結晶化実現を目的として、重イオンビームの3次元レーザー冷却の研究開発が進み、低強度のビームにおいて、1K オーダーの低温ビームが達成される等、1次元結晶化ビームの生成に近づいた。そのような状況で、秩序化さらには結晶化したビームが形成されたことを実証するには、それらの規則的な粒子配置や構造を観測・診断することが必要と考えられる。しかし、高速で周回するビームの構造を直接測定することは非常に困難であり、有効な手法は未だ開発されていない。ビーム構造を測定する手法の開

発が必要である。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究課題では、3次元的に秩序化した冷却イオンビームの力学的な振る舞いについての、理論・数値シミュレーション研究および秩序化・結晶化ビームの断面構造を測定する手法の原理検証実験を実施した。

秩序化ビームについては、MDシミュレーションにより、構成粒子の配置やビーム軸周りの規則的な回転運動等、様々なビーム力学的特性を明らかにするとともに、蓄積リングの動作点(ベータトロンチューン)やビームの線密度、冷却力等の様々な条件に対する、秩序化ビーム特性への依存性を明らかにすることを目的とした。また、秩序化状態にあるビームから結晶化状態へ遷移させる手法の可能性を探った。

秩序化・結晶化ビームの測定手法に関しては、リングから引き出したビームを放射線により着色するラジオクロミックフィルムに照射することで、その規則的で微細な断面構造を簡便に実測できるのではないかと考え、原理検証実験を行った。1 μ m オーダーの精度でビームを照射できるマイクロビームによって、ラジオクロミックフィルムの空間分解能や必要なフルエンスを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 秩序化ビームの MD シミュレーション

秩序化ビームの様々な特性を明らかにするため、適宜改良を施した自作の MD コードを利用して、蓄積リングの集束要素やレーザー冷却の実パラメータを考慮したシミュレーションを実施した。シミュレーションでは、S-LSR(リング周長: 23m、周期数: 6)におけるレーザー冷却実験の条件や実績を考慮した。イオン種は運動エネルギーが 40keV の $^{24}\text{Mg}^+$ イオンであり、高周波電場でバンチ化されていない縦方向に一樣な連続ビームを想定した。縦方向に周期的境界条件を課し、計算量を減らした。

縦方向の強力なレーザー冷却力を、運動量分散を介して水平方向に拡張するため、レーザー(波長: 280nm、スポットサイズ: 5mm)の軌道をビーム軸から平行に数 mm 変位させるテーパ冷却法を採用した。さらに、共鳴結合法による鉛直方向を含む3次元の冷却のため、ソレノイド磁場を弱く励磁するとともに設定ベータトロンチューン v_0 は水平および鉛直方向でほぼ同一の値 ($v_x \approx v_y \equiv v_0 = 1.44 \sim 2.07$) とした。この v_0 は、冷却ビームの共鳴不安定化を避ける条件(1周期あたりのチューンが 0.354 未満)を満たしている。このような基本条件の下で、 v_0 や線密度 N 、レーザーの掃引周波数(離調)や水平方向の変位量等の多数のパラメータを調整して、重イオンビームの冷却過程や冷却完了後の秩序

化状態の形成の要否、ビームの特性等を系統的に調べた。

(2) ラジオクロミックフィルムのマイクロビーム照射実験

ラジオクロミックフィルムを用いた秩序化・結晶化ビームの構造測定の実験検証では、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設 TIARA において、フィルムへのイオン照射実験を実施した。試料となるラジオクロミックフィルムは、感度や厚みの均一性が高く、取り扱いの容易な Gafchromic フィルム (Ashland) の HD-V2 を選んだ。HD-V2 は、感受層に保護膜がないことから、低エネルギーのイオンビームでも利用可能と考えられる。そこで、TIARA のサイクロトロン、タンデム加速器、イオン注入装置のビームを利用して、HD-V2 のフルエンスに対する吸光度変化のエネルギーおよびイオン種依存性を調べた。着色したフィルムは、汎用の光学スキャナ (EPSON ES-10000G) を用いて読み取り、吸光度として定量化した。

また、フィルムの空間分解能を明らかにするとともに、秩序化・結晶化ビームの断面構造を模擬した照射を行うため、TIARA のシングルエンド加速器によるマイクロビーム照射を行った。約 $1\mu\text{m}$ に集束された 3MeV 陽子マイクロビームを走査してフィルムに間隔の異なる直線や同心円等のパターンをスキャン描画し、生じた着色痕を光学顕微鏡 (Olympus SXZ16) で観察した。上と同様に、得られた画像より吸光度を求め、定量的に評価した。

4. 研究成果

(1) 秩序化ビームの特性

テーパ冷却と共鳴結合法を組み合わせた 3 次元レーザー冷却により、3 次元秩序ビームを生成することができる。 10^4ions/m 台の線密度を有するビームについて、設定ベータトロンチューン $v_0 = 1.44\sim 2.07$ の複数の動作点において形成が可能であった。図 1 に秩序化ビームの断面分布の例を示す。断面構造はいずれも 1 層のシェル状となっており、横方向の規格化エミッタンスは $10^{-12}\text{m}\cdot\text{rad}$ 台であった。また、縦方向の運動量幅は 10^{-6} 台にまで縮小されており、温度に換算すると数 mK の極低温が達成されている。シェルの層数がより多い大きな構造を生成することを目指して、より高い線密度のビームを冷却したが、秩序化構造は形成されなかった。これは空間電荷効果によるビーム加熱が冷却力を上回ったためと考えられる。

秩序化したビームにおいて、個々のイオンは進行方向に垂直な断面内でビーム中心軸の周りに規則的に回転する。そのため、図 2 に示すように、水平 (鉛直) 方向位置と鉛直 (水平) 方向角度で張られる $x\text{-}y'$ ($y\text{-}x'$) 位相空間でビームを見ると、イオンは常にほぼ直線状に分布することを確かめた。その結果、

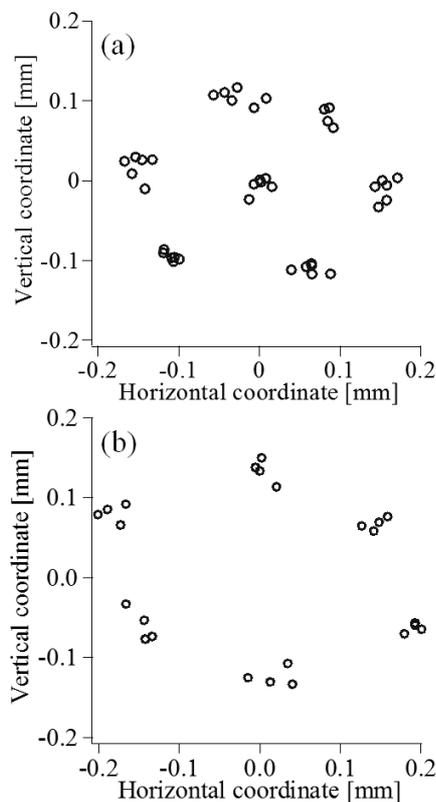


図 1: 3 次元秩序化した $40\text{keV } ^{24}\text{Mg}^+$ イオンビームの断面射影プロファイル。(a) $v_0=1.44$, $N=4.0\times 10^4$ ions/m、(b) $v_0=1.60$, $N=3.0\times 10^4$ ions/m。

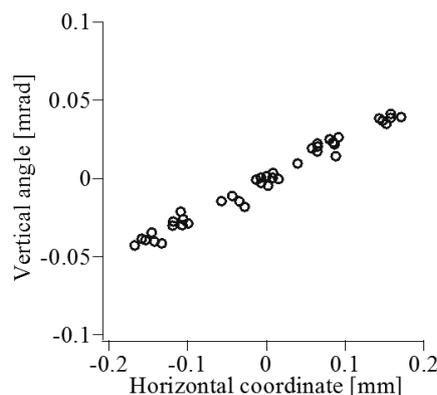


図 2: 図 1(a)のビームの $x\text{-}y'$ 平面における位相空間分布。

この位相空間でのエミッタンスは通常の $x\text{-}x'$ ($y\text{-}y'$) 位相空間のエミッタンス (形状は実空間断面形状に類似) に比べて、数分の一度に小さい。理想的には、 $x\text{-}y'$ および $y\text{-}x'$ 位相空間において、秩序化ビームのエミッタンスはゼロになるのではないかと期待される。このような回転運動によって、構成粒子の平均角速度 (あるいは、閉軌道長) がそろうことで、規則的な粒子配置が持続するものと考えられる。回転運動のリング 1 周あたりの回転数は、空間電荷効果によって抑制されたベ-

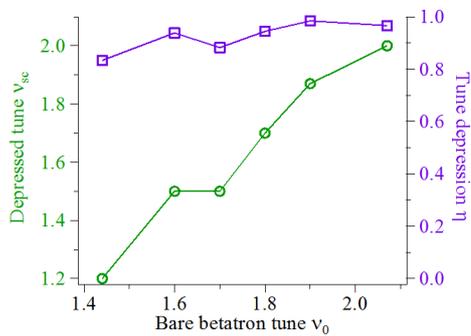


図 3 : 3 次元秩序化したビームのチューンおよびチューンディプレッション。

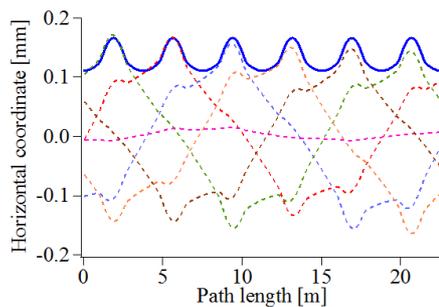


図 4 : 図 1(a)のビームにおける任意の 6 個の粒子についての水平方向軌道およびビームエンベロープ方程式の解。最外周の粒子の軌道と一致するよう、rms エンベロープ方程式の解をスケールさせた。

タトロンチューン v_{sc} に一致していることが分かった。図 3 に v_{sc} およびチューンディプレッション ($\eta \equiv v_{sc}/v_0$) の v_0 に対する依存性を示す。 v_0 が小さいほど v_{sc} が小さくなる傾向があることが分かった。また、 v_{sc} は線密度にはあまり依存しなかった。エミッタンスはかなり小さい (10^{-12} m.rad 台) が、チューンディプレッションは最小でも 0.8 程度であり、秩序化ビームでは必ずしもベータトロン振動が強く抑制されているわけではない。電磁石の集束・発散効果に伴う秩序化ビームの半径の変化は、エンベロープ方程式の解と一致することを確かめた (図 4)。このビームサイズから求められる粒子間の平均距離は 80~90 μ m であり、結晶化したときに得られると考えられる Wigner-Seitz 半径に比べて数十%程度大きな値であった。

冷却されたビームの状態を評価する指標としてクーロン結合定数が有用であり、結晶化したビームのそれは 170 を超えると考えられている。そこで、秩序化したビームの相状態を評価するため、クーロン結合定数を求めた。縦方向の運動は強く冷却されていることから、結合定数は v_0 によらず 100 程度と大きく、状態は液体相にあると考えられる。一方、横方向については、回転運動のためチューンが有限であり、縦方向に比べて 2 桁以上小さな値に留まった。

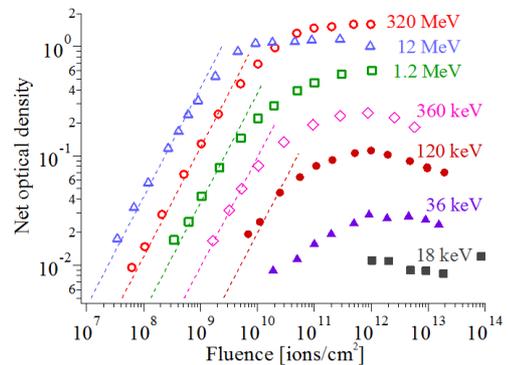


図 5 : HD-V2 フィルムの炭素イオンビーム照射応答のエネルギー依存性。破線は、低フルエンス領域における直線フィッティングである。

秩序化ビームは結晶化の前段階にあると考えられることから、秩序化ビームから結晶化ビームへ状態を変化させる可能性を検討した。ここでは、レーザー照射軸の変位量や周波数等のビーム冷却力を制御することによって、秩序化状態の回転運動を抑制し、 $x-x'$ 、 $y-y'$ 平面におけるエミッタンスを縮小させ、結晶化ビームを形成することを試みた。その結果、構造がわずかに変化する場合が見られたが、多くの場合、冷却力の変化に伴って、規則的な粒子運動や構造は消失しエミッタンスは増大した。結合定数が縦・横方向で非対称であったことを考えると、形成された秩序化状態は、結晶化ビームに比べて擾乱に敏感であり、冷却力の制御による回転運動の抑制は困難であると考えられる。

(2) 冷却ビーム構造測定の原理検証

HD-V2 フィルムのイオンビーム照射応答を図 5 に示す。18keV~320MeV の広いエネルギー範囲で炭素イオンビームを照射し、吸光度をフルエンスの関数としてプロットした。その結果、エネルギーが高いほど、感度 (単位フルエンスあたりの吸光度増加) および応答の線形性が高くなる傾向があることが分かった。エネルギーによって $10^7 \sim 10^{10}$ ions/cm² の比較的低いフルエンスで着色する。ただし、10keV オーダーの低エネルギーでは、吸光度変化が小さいことに加えて、帯電したフィルムの放電による不要な着色を避けることが困難となることから、炭素ビームでは 120keV 程度がエネルギーの下限と考えられる。イオン種依存性については、同一速度 (30keV/u) の陽子、炭素、金イオンビームの照射応答を比較したところ、阻止能の大きい重イオンほど低フルエンスで着色することが分かった。以上より、10keV/u オーダー以上のエネルギーを有するビームについて、HD-V2 フィルムを用いたプロファイル計測が可能であるということを明らかにした。

次に、マイクロビーム照射実験の結果を述べる。照射したフィルムは光学顕微鏡を用いて観察した。図 6 に示すように、複数の直線

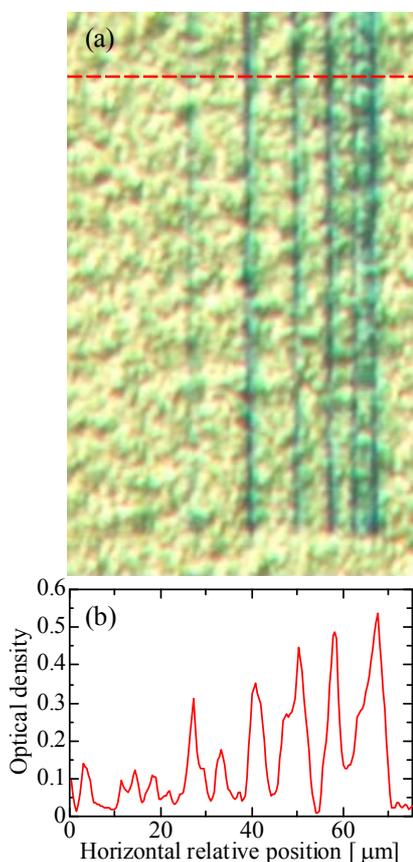


図 6 : (a)3MeV 陽子マイクロビームにより直線 7 本 (間隔 : 12.5, 10, 7.5, 5, 2.5, 1.25 μm) を描画した HD-V2 フィルムの光学顕微鏡画像。(b)赤破線に沿った領域の吸光度分布。

を間隔を変えて描画した場合、5 μm よりも広い間隔は十分に分離できたが、2.5 μm や 1.25 μm の間隔は着色痕が重なり、分解できなかった。また、直線の着色領域の太さは半値全幅で 2~3 μm 程度であった。マイクロビームの直径 (半値全幅で約 1 μm) よりも幾分大きいのは、主としてフィルム中での陽子の多重散乱や発生する 2 次電子によるものと考えられる。したがって、HD-V2 フィルムを光学顕微鏡によって観測することで、最小で 2 μm の空間分解能でイオンビームの照射野を計測・評価できると考えられる。3 重の同心円 (直径約 45 μm 、90 μm 、135 μm) も十分に観測することができた。HD-V2 フィルムを用いて、図 1 に示されているような秩序化ビームの断面形状 (直径数百 μm で数十 μm の間隔を有するシェル構造) が原理的に計測可能であることが示された。なお、光学スキャナでは、2400dpi (11 μm) 等の高い設定解像度で読み取ったにも関わらず、30 μm 程度の間隔を分離するのが限界であった。設定解像度よりも悪化するの、読み取り光の散乱や焦点位置の微調整ができないことが主な原因と考えられる。必要な 3MeV 陽子ビームのフルエンスは $10^9\sim 10^{10}$ ions/cm² 程度であった。より感度の高いフィルムやより阻止能の大きい重イオンビームを用いることで、より低いフル

エンスでの着色が期待できる。したがって、一般に低強度である秩序化・結晶化ビームの断面分布計測への適用は十分可能であると考えられる。

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 3 件)

Y. Yuri, K. Narumi, and T. Yuyama, "Characterization of a Gafchromic film for the two-dimensional profile measurement of low-energy heavy-ion beams", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 828 (2016) 15. [査読有]

DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.055

Y. Yuri, "Three-Dimensional Ordering of Cold Ion Beams in a Storage Ring: A Molecular-Dynamics Simulation Study", AIP Conference Proceedings 1668, (2015) 050005. [査読有]

DOI: 10.1063/1.4923124

A. Noda, M. Nakao, H. Okamoto, K. Osaki, Y. Yuri, H. Souda, H. Tongu, K. Jimbo, M. Grieser, Z. He, and A. Smirnov, "Ultralow Emittance Beam Production Based on Doppler Laser Cooling and Coupling Resonance", Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, IPAC14, (Dresden, Germany, 2014/6/15-20) p.28-33. [査読無]

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/moza01.pdf>

[学会発表] (計 7 件)

百合庸介, 佐藤隆博, "ラジオクロミックフィルムを用いた微小荷電粒子ビーム形状の高分解能測定", 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017/03/19, 大阪大学 (大阪府豊中市)

百合庸介, 鳴海一雅, 湯山貴裕, "ガフクロミックフィルムの低エネルギーイオンビーム強度分布計測への適用", 第 13 回日本加速器学会年会, 2016/08/09, 幕張メッセ (千葉県千葉市)

Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Agematsu, T. Yuyama, H. Seito, and S. Okumura, "Use of a Gafchromic film HD-V2 for the Profile Measurement of Energetic Ion Beams", 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, 2016/07/05, Jyväskylä (Finland)

Y. Yuri, T. Ishizaka, T. Yuyama, T. Agematsu, H. Seito, S. Okumura, and K. Narumi, "Transverse Intensity Distribution Measurement of Ion Beams Using Gafchromic Films", 7th International Particle Accelerator Conference, 2016/05/09, Busan (Korea)

百合庸介, “レーザー冷却された重イオンビームの3次元秩序化に関する分子動力学シミュレーション”, 日本物理学会第71回年次大会, 2016/03/19, 東北学院大学(宮城県仙台市)

Y. Yuri, “Three-dimensional Coulomb Ordering of a Highly Space-charge-dominated Ion Beam in a Storage Ring”, 6th International Particle Accelerator Conference, 2015/05/04, Richmond (USA)

Y. Yuri, “Three-Dimensional Ordering of Cold Ion Beams in a Storage Ring: A Molecular-Dynamics Simulation Study”, 11th International Workshop on Non-Neutral Plasmas, 2014/12/01, サポート高松(香川県高松市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

百合 庸介 (YURI, Yosuke)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部・主幹研究員

研究者番号: 90414565