OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Improvement of beam quality by phase bunching in the central region of the TIARA AVF cyclotron
Author(s)	宮脇, 信正
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105806
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　宮脇　信正　）	
論文題名	Improvement of beam quality by phase bunching in the central region of the TIARA AVF cyclotron （TIARA AVFサイクロトロンの中心領域における位相バンチングによるビーム品質の改善）

論文内容の要旨

本研究は、AVFサイクロトロンの中心領域で発生する位相バンチングを用いてビームの品質を改善することを目的とする。量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤研究所のイオン照射研究施設（TIARA）のAVFサイクロトロンでは、集束方式のマイクロビーム形成に必要なエネルギー幅のビームを得るために、加速RFに対するビームの位相幅を縮小する方法の一つとして位相バンチングを用いた。本研究では、位相バンチングの発生のためのモデルを構築してTIARA AVFサイクロトロンの中心領域に適用し、これによる加速ビームの測定によって位相バンチングの発生を実証するとともに、位相バンチングが発生しない場合に比べて加速ビームの品質が改善することを示す。

位相バンチングはサイクロトロンで最初の数ターンの加速でビームが縦方向にバンチングし、横方向に広がる現象であり、これまでシミュレーション等の報告はあったが、測定結果は示されていない。そこで、位相バンチングの発生条件を明らかにするため、幾何軌道解析モデルを構築した。この結果を基に、TIARA AVFサイクロトロンの加速ハーモニックモード（h）1と2に対して、前者は位相バンチングが発生せず、後者が発生する中心領域に改造した。

次に位相バンチングを測定するため、サイクロトロン内部でビーム位相分布の測定を可能にするシンチレータを取り付けたプローブを開発した。シンチレータからの発光は磁場の影響が小さい鉄ヨークの外に設置した光電子増倍管に接続した光ケーブルで輸送し、電気信号に変換して解析した。入射ビームの加速ＲＦに対する初期位相としてサイクロトロンの入射ビームラインのバンチャーの相対位相を変えて、本プローブによる加速ビームの位相分布を測定することによって、位相バンチングの発生が実証された。

さらに、位相バンチングによるサイクロトロン内部でのビームの横方向の広がりを半径方向にビーム軌道を制限する位相スリットも用いて測定した。その結果、位相バンチングが発生しないh=1の条件のビームは初期位相の変化に伴って縦方向も横方向も大きく変化するが、位相バンチングが発生するh=2の条件のビームはほぼ横方向の変化だけであった。これは、位相バンチングが発生する場合はバンチャーの初期位相の変化である縦方向の変化が横方向の変化に変換しており、縦方向の変化がほとんど無いことからビームのエネルギー利得の変化も小さいことがわかった。また、この結果から入射ビームの半径方向の広がりと取出し半径近くのビームの広がりを構築したモデルで計算し、h=2のビームの広がりがh=1より小さい結果が得られ、実際に加速したビームをサイクロトロンの出口のエミッタンスモニターの測定でも同様の結果が得られた。従って、位相バンチングにより加速したビームの品質が改善されていることがわかった。

本研究の成果は、他のAVFサイクロトロンに適用することができ、ビームのエネルギー幅の縮小化とこれによる輸送効率の向上が期待される。また、数百MeV級のサイクロトロンでマイクロビーム形成を達成したように、ビーム利用実験の精度を高め、他分野への貢献が期待できる。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　宮脇信正　）	
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主査　教授	民井 淳
	副査　教授	青木 正治
	副査　教授	野海 博之
	副査　特任教授（常勤）	福田 光宏
	副査　講師	依田 哲彦

論文審査の結果の要旨

本論文は、AVF サイクロトロンの中心領域で発生する位相バンチングの機構を解き明かし、それを適用することによりイオンビームを高品質化する研究について論じている。特に、量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤研究所のイオン照射研究施設（TIARA）の AVF サイクロトロンにおいて、正弦波型の加速電圧を用いたサイクロトロンで標準的に得られるイオンビームのエネルギー幅の 1/10 に相当するΔE/E～0.02%を達成し、世界初のビーム径 1μm の高エネルギー重イオンマイクロビームを形成することを目標に掲げており、極めて挑戦的な研究論文といえる。位相バンチング現象の存在は 1960 年代に示唆されていたものの、これまでにそれを実証し、サイクロトロンで加速したビームの品質改善に応用した実例はなかったことから、本研究の狙いは学術的に大きな価値がある。本論文は、位相バンチングの発生条件の解明と TIARA AVF サイクロトロンへの適用、位相バンチングの測定方法とその機器の開発、実ビーム測定による位相バンチング効果の評価という流れで論じられており、理論モデルの設計からシミュレーション計算、および実証実験による解析と考察が丁寧に論理的にわかり易く記述されており、論文のクオリティは高い。

位相バンチングは、サイクロトロンの中心領域での最初の数ターンの加速において、ビームが縦方向（進行方向）にバンチングし、横方向（半径方向）に広がる現象であり、これまでシミュレーション等の報告はあったが、測定結果は全く示されていなかった。幾何学的な軌道解析モデルを独自に考案してビーム軌道とビーム位相の相関を解析し、TIARA AVF サイクロトロンの加速ハーモニックモードが h＝1 の場合には位相バンチングが発生せず、h ＝2 の場合のみ位相バンチングが発生することを見出した。これにより、中心領域の電極配置を改良し、位相バンチングを発生させるための必要条件を明らかにしたことは特筆すべきことである。また、位相バンチングを測定するため、サイクロトロン内部のビーム位相分布測定を可能にするプラスチックシンチレータを取り付けた新しいプローブの開発に取り組み、シンチレーション光を鉄ヨークの外に設置した光電子増倍管まで光ケーブルにて輸送するなどの工夫により磁場中でのビーム位相計測を可能にした。また、入射ビームラインのバンチャーの相対位相を変えることでビーム位相分布の初期位相依存性を測定することに成功し、位相バンチングの発生を初めて実証したことは注目に値する。さらに、位相スリットとバンチャーを組み合わせた測定により横方向と縦方向の粒子の運動の相関を解析し、位相バンチングが発生する場合には縦方向の変化が横方向の変化に変換され、ビームのエネルギー利得の変化が小さくなることを明らかにしたことは重要な成果である。実ビームのエミッタンス測定結果から位相バンチングによるビーム品質の改善を実証しており、その意義は大きい。

本研究の成果がビーム品質の向上と世界初の数百 MeV 級高エネルギー重イオンマイクロビームの実用化に大きく寄与したことは、一般的なサイクロトロンの設計仕様を標準化し得るインパクトをもたらしただけでなく、量子ビーム利用実験の精度を格段に高めることにもつながり、多様な分野における量子ビーム科学の発展にも大いに貢献するものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値があるものと認める。