

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	小 島 邦 洸
学位授与の要件	学位規則第 4 条第①・ 2 項該当		
論 文 題 目			
Theoretical study of high-intensity hadron beam stability in linear and circular accelerators (線形および円形加速器中の大強度ハドロンビームの安定性に関する理論的研究)			
論文審査担当者			
主 査	教 授	岡 本 宏 己	
審査委員	教 授	栗 木 雅 夫	
審査委員	准 教 授	両 角 卓 也	
審査委員	准 教 授	檜 垣 浩 之	
審査委員	上席研究員	百 合 庸 介	
(所属：量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所)			
〔論文審査の要旨〕			
<p>本論文は、位相空間上で高い粒子密度を持つ高品位ハドロンビームの安定性に関する理論的研究成果の報告である。電磁石や加速電場等が生む人為的な外部ポテンシャルが全く誤差を含まない理想的状況下でも自然に発生し得る、クーロン自己場駆動の共鳴的ビーム不安定性について詳しく論じられている。線形および円形のハドロン加速器それぞれに特徴的な動作条件を念頭に、共鳴現象の基本的な発生メカニズムを明らかにした重要な研究成果である。</p> <p>第 1 章は単粒子軌道力学の基礎に関する簡潔な解説で、加速器設計上重要ないくつかの物理量が定義されている。第 2 章も引き続き、次章以降の内容の理解に不可欠な、既知のビーム力学理論の紹介に充てられている。粒子間クーロン相互作用が単粒子軌道運動に及ぼす影響に注目し、後の議論の出発点となる 1 次元の集団共鳴条件が提示されている。本論文の著者による独自の成果は第 3 章と第 4 章にまとめられている。</p> <p>第 3 章は、円形加速器における共鳴的ビーム不安定性に関する一般論である。円形加速器中の大強度ハドロンビームは軌道軸方向に極めて長く伸びており、シンクロトロン振動の影響は比較的小さい。この点に鑑み、軌道軸に直交する平面上でのベータトロン振動のみに着目した 2 次元の一般共鳴理論が構築されている。著者は、大強度ビームで観測される共鳴現象が「多くの粒子が集中するビーム中心部近傍 (ビームコア) の集団共鳴」と「コアの周囲に低密度で広がるビーム外縁部 (ビームハロー) の非集団共鳴」に大別できると結論付けている。これまで業界では「ビームコア部には集団共鳴と非集団共鳴が混在する」との認識が一般的であったが、本論文の著者はこの認識が不正確であることを系統的かつ自己無撞着な 2 次元多粒子シミュレーションにより明らかにした。第 2 章で紹介した 1 次</p>			

元集団共鳴条件を2次元に拡張し、新公式がシミュレーション結果をよく説明することが示されている。また、提案された2次元集団共鳴条件に基づき、加速器の安定動作領域を可視化した“チューンダイアグラム”が提案されている。本論文で導入された新ダイアグラムでは従来の安定領域図が抱えていた問題点が解決されており、より正確かつ迅速な大強度加速器の運転条件の最適化が可能となった。

第4章では、線形加速器における共鳴的ビーム不安定性の一般論が展開されている。同一軌道を多数回周回する円形加速器の状況とは異なり、線形加速器に入射されたビームは短いタイムスケールで出力されることになる。しかしながら、ビームの運動エネルギーが低く、加えて位相空間粒子密度が円形加速器中のビームと比べて遙かに高いため、空間電荷相互作用が深刻な粒子損失の原因となり得ることが知られている。また、線形加速器中のビームは楕円体に近く、円形加速器の議論では無視されたシンクロトロン運動の安定性も併せて考慮しなければならない。この状況に対応するため、著者は前章の2次元集団共鳴条件にシンクロトロン振動数を取り入れ、3次元化している。多粒子シミュレーションでは加速によるエネルギー増大の効果も導入し、動作点が理論的に予想される集団共鳴帯を横切る際にビームの安定性が損なわれることが示されている。各空間自由度方向の初期エミッタンスの比を適切に調整することでシンクロベータトロン結合差共鳴を抑制できることも証明されており、実機を設計する上で有益な数多くの物理的知見が与えられている。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与されるに十分な資格があるものと認められる。

備考：審査の要旨は、1,500字以内とする。