

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	福 島 慧
学位授与の要件	学位規則第4条第①・2項該当		
論 文 題 目			
Stability analysis of non-neutral ion plasma in a linear Paul trap and its application to particle beam dynamics (線形ポールトラップ中に捕獲された非中性イオンプラズマの安定性解析とその粒子ビーム力学への応用)			
論文審査担当者			
主 査	教 授	岡 本 宏 己	
審査委員	教 授	高 根 美 武	
審査委員	教 授	栗 木 雅 夫	
審査委員	准教授	檜 垣 浩 之	
〔論文審査の要旨〕			
<p>粒子加速器が生み出す荷電粒子ビームは現在、基礎科学から医療・産業まで、様々な分野で積極的に活用されている。その有用性が各方面で認識されるに伴い、より性能の高い加速器の開発が強く求められるようになった。既存の加速器を凌駕する、先進的な次世代加速器の設計には粒子ビームの物理的性質に対する深い理解が必要不可欠である。広島大学はこの目的のため、非中性プラズマトラップ技術を応用した独自のビーム力学実験装置“S-POD”(Simulator of Particle Orbit Dynamics の略)の開発を進めてきた。S-PODは非常にコンパクトかつ安価であるばかりでなく、基本パラメータの可変性の点でも、大規模な加速器に依拠した従来の実験手法と比べ優れている。本論文の著者は、S-PODによって得られた実験データを多粒子追跡コード等に基づいて詳細に解析し、高密度荷電粒子ビームが共鳴的に不安定化する物理的条件を明らかにした。加えて、現在使用されている“線形ポールトラップ”(高周波電場を用いた非中性プラズマ捕獲装置)を発展させた、新奇な多重極イオントラップの基本設計についても論じている。</p> <p>本論文の冒頭部(第1章～3章)は加速器力学系と非中性プラズマトラップとの対応関係ならびにS-PODの動作原理、本研究で用いられた数値計算手法の解説等に費やされており、著者自身が上げた研究成果の報告は第4章以降にまとめられている。まず第4章で、位相空間密度の高い荷電粒子ビームにおいて顕在化する集団的な共鳴不安定化現象の数値解析結果を提示し、過去数年にわたって行われたS-POD実験のデータと比較検討している。この種のビーム不安定性は加速器のラティス構造、換言すれば、線形外部集束力の周期的変動パターンに依存して発生する。著者はいくつかの典型的な強集束ラティス構造を想定した多粒子シミュレーション及び古典的なブラソフ理論に基づくビーム安定性の評価を系統的に展開し、予想される共鳴不安定条件がS-PODによる実験観測データとほぼ矛盾</p>			

しないことを確認した。とくに、ビーム強度が非常に大きい場合、ベータトロンチューンが四半整数値となる動作点近傍に強い線形共鳴不安定帯が現れることを明快に示した意義は大きい。

第5章にはいわゆる共鳴横断現象に関する解析結果が示されている。この現象は近年注目を集めている非スケール型固定磁場強集束加速器 (ns-FFAG) において不可避免的に発生するため、理論・実験両面からの検証が望まれていた。著者による多粒子シミュレーションのデータは S-POD による実験観測結果をよく説明している。数値計算の結果に基づき、ns-FFAG の動作点が空間電荷駆動の四半整数共鳴帯を横断する際に起こるエミッタンス増加の割合と共鳴横断速度との間に成り立つ近似的なスケール則を導いている。また、英国ラザフォードアップルトン研究所の加速器物理グループと共同で、双極誤差磁場による整数共鳴の発生とその横断に対する解析も進め、多くの物理的知見を得ている。

S-POD を使った一連の研究成果を踏まえ、現有システムでは実行困難な実験を可能にする新しい多重極イオントラップの設計指針が第6章で提案されている。新型トラップは標準的な四重極円柱電極の間に補助電極を配置した構造になっており、低次非線形場の強度と時間構造を線形集束場とは独立に制御することができる。ラプラス方程式を数値的に解くことによって補助電極の形状と位置を最適化すると共に、非線形場の相対強度を与える簡便なスケール則を見出している。また、電極の設置誤差が理想的な多重極場を与える影響についても詳しく分析されている。

以上のように本論文の著者は、S-POD を基盤とする“実験室加速器物理”の創成へ向けた基礎研究を理論面から支え、ここ数年行われてきた様々なビーム力学実験に大きく貢献した。本論文の成果は、今後行われる更に発展的な S-POD 実験に対してのみならず、次世代粒子加速器の設計・性能向上を実現していく上でも非常に有用である。よって、この著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。