

論文審査の結果の要旨

氏名：小 林 大 地

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：極限的高ベータプラズモイドの超アルヴェン速度加速機構の検証

審査委員：（主査） 教授 浅井 朋彦

（副査） 教授 高橋 努 教授 岩本 弘一

宇宙空間はプラズマで満たされており、たとえば太陽フレアやコロナ質量放出によって放出される爆発的なプラズマの解放は無衝突衝撃波を励起し、非熱的粒子や宇宙線を生成する。このような高エネルギー粒子は、乱流による散乱を介したフェルミ加速により生じると考えられているが、種粒子の加速メカニズムなど、なお数多くの問題点が未解決のままである。また最近の観測技術の発展により、フェルミ加速のみでは説明がつかない観測例が報告されるようになってきている。たとえば、ガンマ線バーストのジェット領域などでは相対論衝撃波が形成され、これは高強度の電磁波を放射することから、航跡場加速が効率よく機能する可能性がある。あくまでシミュレーションによる結果であるが、航跡場加速が衝撃波遷移領域で非熱的粒子をつくる可能性が指摘されており、フェルミ加速の注入問題の候補に加え、フェルミ加速を介さない宇宙線加速のメカニズムとしても注目されている。

フェルミ加速は、衝撃波のマクロな構造だけで決まることから、解析的に扱いやすい理論として広く受け入れられてきた。また、これらの宇宙空間における観測では、イメージングによるマクロな情報のみが得られ、電子スケールのミクロな物理過程は見落とされることが多い。

本研究は、このような背景において、プラズマ中の無衝突衝撃波の大域的振る舞いと、電磁気的な局所的構造を同時に観測するため、その体積の大部分で β 値（プラズマの熱圧力/磁気圧）が1を超える極限的な磁場構造を持つ磁場反転配位（Field-Reversed Configuration: FRC）を磁気圧差により加速することで、超アルヴェン速度プラズマ流を生成可能であること、また対向するプラズマ流の衝突により衝撃波形成が可能であることを実験により示し、また、FRC境界領域が磁化し磁気流体力学(Magnetohydro Dynamics: MHD)的に振る舞うことに着目し、シミュレーションによりその加速メカニズムについて検証した、新規性、独自性の高い研究成果である。

本論文の8章からなり、それらの概要と評価は以下の通りである。

第1章は、学位論文の序論であり、本研究の背景と目的および構成が記されている。特に宇宙空間に存在するプラズマは、粒子間の衝突の平均自由行程が、プラズマの特徴的な長さに比べて十分長い無衝突プラズマであり、また、ベータ値（ \equiv プラズマ圧力/磁気圧）が1を超え、実験室系においては再現が困難であること、また、太陽フレアや超新星爆発などの天体現象により生じる衝撃波は無衝突プラズマ中に生じる無衝突衝撃波であり、電場や磁場を介してエネルギーの散逸が起きること、さらに電場や磁場による作用で、粒子が高エネルギーにまで加速される可能性があり、天文学分野における重要な研究対象となっていることが述べられている。

第2章では、衝撃波に関連する基本的な概念が示され、またFRC様の磁化プラズモイド衝突において生じる衝撃波の様相について考察されている。

第3章では、本研究において、超アルヴェン速度プラズマ流を形成する極限的な磁化プラズマの平衡配位であるFRCについて、その構造や圧力平衡を記述するモデルが解説され、また、FRC様の磁化プラズモイドの生成、加速、衝突・合体過程について、MHDシミュレーションによる計算結果を用いて説明されている。宇宙空間での衝撃波を実験で再現するには、無衝突かつ高ベータなプラズマ群を加速することが要求されるが、大部分の実験室プラズマの β 値は、0.1程度のオーダーであり、宇宙プラズマと同等な β 値を持つプラズマ流の生成は困難であることが示され、本研究では、これを解決する新たな衝撃波実験の手法として、2つの高ベータプラズモイドの衝突合体が提案されている。

第4章では、本研究でFRCの生成・加速に用いたFAT-CM装置の特徴や機能に加え、各種計測手法とその原理が解説され、また、FAT-CM装置で生成されるプラズモイドの各パラメータが記されている。

第5章では、プラズモイド加速機構の評価に用いられたMHDシミュレーションについて、その計算

モデルや条件などが記述されている。境界条件や初期条件に最適化を施し、また、初期ガス分布について実験におけるガスの拡散や電離度を考慮し、さらに回路計算においてコイル同士のカップリングを考慮して条件設定を行うことで、FAT-CM 装置で生成される磁化プラズモイドの圧力、速度などの大域的挙動を再現することに成功したことが示されている。

第6章では、磁気圧勾配による高ベータプラズモイドの加速について実験的に検証した結果が示されている。加速領域における FRC 様の磁化プラズモイドの速度は、その領域におけるアルヴェン速度と一致し、またその後さらに加速され、装置中央断面通過時には、磁力線の変動の特性速度であるアルヴェン速度を超えることが示された。

第7章では、アルヴェン速度やイオン音速を超えて加速された高ベータプラズモイドの衝突による衝撃波の形成を試みた実験の結果が示されている。密度の多点計測により、衝撃波形成を示唆する密度波形の急峻な変化が観測され、その観測結果から衝撃波面の伝播速度が推定されている。実験を再現した MHD シミュレーションでもプラズモイドの衝突時に圧力の急峻な変化が観測され、この結果から衝撃波面の厚さが見積もられた。また、中性子計測の結果は非熱的粒子の生成を示唆しており、衝突速度に依存してその強度や時間発展の様子が変化していることが示された。

第8章では、上記の研究により得られた結論と今後の展望が記述されている。

以上、本論文に記されている研究は、執筆者である小林大地氏が主体的に行ったものであり、また、その成果は、小林氏を筆頭著者とする4編の学術論文として既に出版、または受理されている。このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（理学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和3年2月18日