

論文の内容の要旨

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

本論文は、無衝突衝撃波を実験室系で形成し、大域的観測と局所的観測を両立し得る手法として、極限的高ベータプラズモイドの超 Alfvén 速度衝突による衝撃波実験を実現することを目的とする。

宇宙空間に存在するプラズマは、多くの場合、ベータ値（≡プラズマ圧力／磁気圧）が 1 を超える。また、希薄で高温な状態であり、粒子間衝突がほとんど起きない無衝突プラズマである。太陽フレアや超新星爆発などの天体現象により高速プラズマ流が生成され、プラズマ中に無衝突衝撃波が形成されることがある。多くの観測結果から、無衝突衝撃波の周辺に非熱的な高エネルギー粒子が存在することが示唆されており、無衝突衝撃波は宇宙線などとして観測されるような高エネルギー粒子の加速源の一つとして考えられている。衝撃波周辺での粒子加速の機構は、フェルミ加速が有力な候補であるとされてきたが、近年の観測結果からは、それだけでは説明ができない高エネルギー粒子の存在などが示唆され、粒子シミュレーションからは、高エネルギー粒子が引き起こす不安定性によって形成される電場や磁場を介した加速など、多くの加速機構の候補が提案されている。しかし、粒子加速のメカニズムや無衝突衝撃波の様相との関連など未解明な点も多く、現在も精力的に研究が進められている。

衛星などによる観測で衝撃波の大域的描像を得ることはできるが、内部の電場・磁場構造などの局所的観測は困難であるため、シミュレーションにより大域的描像を再現し、内部構造などを検証することがある。しかし、観測できないパラメータなどについては、人為的に調整された計算条件として与えることとなり、仮に大域的描像が再現できても、与えたパラメータや解く物理過程、得られた内部構造の妥当性の判定は困難である。実験室系で宇宙空間での衝撃波を再現できれば、衝撃波の大域的描像と内部構造を同時に評価することができる。したがって、実験結果を用いて観測結果やシミュレーション結果を検証することで、衝撃波研究の発展への貢献が期待される。一方で、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、ほとんどの実験室プラズマのベータ値は、0.1 程度のオーダーであり、これまでに実施された数多くの実験研究でもこれらを同時に実現することは困難であった。近年開始された高出力レーザーを用いた衝撃波実験では、無衝突衝撃波の形成とその周辺での磁場形成の観測などに成功し、世界的にも注目を浴びている。この方法では、数 mm 程度の金属箔間隙に衝撃波が生じるため、その観測は光学的な手法に限られており、衝撃波周辺の局所的な観測は困難である。また、プラズマ生成のためにレーザーの電源に投入するエネルギー（数 GJ）に対して、生成されたプラズマが持つエネルギー（数十 kJ）の割合は約 0.001%と、コストの面でも課題がある。

新たに提案する実験手法では、1 を超えるベータ値を持つ磁場反転配位（Field-Reversed Configuration: FRC）様の磁化プラズモイドを、Alfvén 速度やイオン音速といった特性速度を超える相対速度で衝突させることで衝撃波を形成する。衝突性から無衝突領域の FRC 様の磁化プラズモイドを用いることで、幅広い条件領域での衝撃波形成が可能である。さらにこの実験では、メートル級のチャンバー内に衝撃波が形成されるため、衝撃波周辺や内部の電場・磁場構造などの局所的観測が比較的容易である。本論文では、磁気圧勾配による FRC 様の磁化プラズモイドの加速を試み、実験結果と磁気流体力学（MHD）シミュレーションの結果を比較することでその加速過程について検証した。その結果、FRC 様の磁化プラズモイドを用いることで、太陽風や超新星残骸など同等なベータ値や Alfvén Mach 数（≡流速／Alfvén 速度）、イオン Mach 数（≡流速／イオン音速）の高ベータプラズマ流を生成できることが実証された。また、この方法で生成したプラズマ流を衝突させた実験において、衝撃波形成や粒子加速が示唆され、本論文で提案する実験手法の実現可能性が示された。

本論文は 8 章より構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章では、研究背景として、無衝突衝撃波やその周辺での粒子加速について解説した。また、実験室系での無衝突衝撃波の再現の重要性を述べた上で研究目的を示し、FRC 様の磁化プラズモイド衝

突による衝撃波実験についてその特徴を解説した。

第2章では、衝撃波に関連する波について基本的な概念を示し、それぞれの伝播速度について解説した。また、衝撃波周辺における物理量の跳び条件からいくつかの衝撃波の分類について説明し、FRC様の磁化プラズモイド衝突において生じる衝撃波について考察した。FRC様の磁化プラズモイド衝突では、セパラトリックス近傍とトーラスの軸付近で、衝撃波の状態や伝播方向などが異なることが予想された。

第3章では、FRCの平衡状態やベータ値、エネルギー、圧力平衡を記述するモデルについて解説した。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した。

第4章では、本研究で用いたFAT-CM装置の特徴や機能に加え、各種計測器とその原理について解説した。また、FAT-CM装置で生成されるFRC様の磁化プラズモイドの各種パラメータを示し、衝突合体の前後で比較した。

第5章では、MHDシミュレーションにおける計算モデルや計算条件などについて示した。本研究以前は、人為的なプラズマのパラメータの調整なしには実験で生成されるプラズモイドの大域的挙動を再現できなかったが、本研究において、境界条件や初期条件の設定に最適化を施し、人為的な調整なしにFAT-CM装置で生成される磁化プラズモイドの熱圧力と大域的挙動を同時に再現することに成功した。これにより、MHD近似の範囲で実験結果を検証することが可能になった。

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な検証を行った。加速領域におけるFRC様の磁化プラズモイドの速度は、その領域でのAlfvén速度と一致した。その後磁場の弱い領域に入射される際には、さらに加速され、装置中央断面を通過する際にはAlfvén速度を超えることが示された。また、MHDシミュレーションにおいても同様な加速過程が得られたことから、加速過程がMHD近似に矛盾しないことがわかった。これらの結果を比較することで加速機構について考察し、磁気圧勾配による加速で、Alfvén速度やイオン音速を超える速度の高ベータプラズマ流を形成可能であることが実証された。

第7章では、前章で実証した方法で、Alfvén速度やイオン音速を超える速度まで加速した高ベータプラズモイドを衝突させ、衝撃波の形成を試みた。電子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とその伝播の様子が観測され、その伝播速度が200 km/s程度であることがわかった。典型的な実験条件を用いて実施したMHDシミュレーションにおいても、衝突時において衝撃波面とみられる圧力の急峻な変化が観測され、その結果から衝撃波面の厚さが0.3 m程度と推定された。また、熱的な過程では想定できない中性子が観測され、衝撃波周辺で起こる何らかの粒子加速による非熱的粒子の生成が示唆された。中性子信号は、衝突速度に依存してその波形が変化したことから、衝突速度による衝撃波の様相の変化が示唆された。さらに、エネルギーフローの評価からは、加速したプラズモイドを衝突合体することにより、単一のプラズモイド移送に比べてエネルギーの減衰が抑制されることが示され、運動エネルギーが内部エネルギーへ変換されていることがわかった。密度や中性子の観測結果を踏まえて考察すると、この結果は、衝撃波形成に伴う粒子加速を介したプラズマ加熱を示唆していると考えられる。以上の結果から、本論文で提案した手法による衝撃波実験の実現可能性が示された。

第8章では、本論文の結論と今後の展望について示した。本研究により、極限的高ベータプラズモイドを用いた手法による衝撃波実験の実現可能性が実証された。また、無衝突衝撃波領域にわたる実験には、プラズモイドの低密度・高温化が課題であるが、これまでに当グループで開発された低密度FRCの生成法を初期プラズモイド生成に適用することで、無衝突衝撃波の領域での実験が期待される。さらに、本研究で得られた実験結果や、プラズモイドを低密度・高温化した場合のMHDシミュレーションから、本手法により実現可能な領域を評価した。Alfvén Mach数やイオン Mach数については、現状のFAT-CM装置における実験条件で宇宙プラズマに近い条件を実現できていることがわかった。また、衝撃波の衝突度については、低密度・高温化したプラズモイドを用いることで、超新星残骸中に生じる衝撃波に近い条件領域を実現できることも示された。したがって、この条件下での実験の実現が、無衝突衝撃波実験として展開するための今後の課題の一つである。また、衝撃波実験として展開していく上で、励起された衝撃波の大域的振る舞いのより詳細な観測や、電場や磁場などの局所的観測の実施も今後の課題である。