

論文題名： Mechanical Ion Acceleration in The Self-Contracting Plasma
(自己収縮プラズマにおける力学的イオン加速)

論文要旨

平成23年1月

申請者 日本大学大学院理工学研究科博士後期課程量子理工学専攻 西尾峰之

本研究の対象である自己収縮プラズマは、電流によって作り出された磁場によって系全体の構造が影響を受けるように収縮する系であると定義される。自己収縮プラズマのダイナミクスを考えると、初期媒質の外形で開始した放電により生成されたプラズマは、大電流と自己磁場により半径方向に運動を開始する。進展する電流シートの速度は超音速となり境界面に衝撃波が発生し、真空との界面は磁気壁となる。初期媒質のほとんどはプラズマに取り込まれ、最終的には軸上に円柱状ピンチプラズマが形成される。この高速な半径方向収縮の過程において、MeVオーダーの粒子加速が発生することが知られている。しかし粒子加速現象のメカニズムは現在でも解明されていない。半径収縮に伴って発生するこの粒子加速に関して多くの加速機構モデルが提案されている。この分野において妥当であると長らく考えられているメカニズムは、流体力学的不安定性に伴う電流方向への電場の発生による加速である。これは放電現象の結果としての粒子加速であるので、電場の発生を考慮するのが自然であるという考えからであると思われる。多くのモデルが提案されている中でその妥当性の検証のためには、加速機構へ制約を課すことのできる実験条件を選ぶことが必要である。そこで本研究においては、実験的見地から粒子加速機構モデルの比較を行い、主要なメカニズムを特定することを目的とした。

本研究で用いられたZピンチ放電装置は日本大学SHOTGUN-IIIである。重要なパラメータとしては、充電電圧が20~25 kVで正負の極性を変えることが可能である。真空中にArガスを超音速ガスノズルを用いて射出し、それを初期媒質としている。本研究では従来型とは異なるガスノズルを用いており、ガス形状が開いた円錐系になっているので発散型ガスパフZピンチ(角度は10度もしくは30度)と呼ばれる。この発散型Zピンチプラズマの特徴は、半径方向だけでなく軸方向にもローレンツ力が働き、軸方向で非一様な収縮によってより高密

度高温なプラズマを生成しうることである。このような自己収縮プラズマの軸方向に粒子が加速され、その高エネルギー粒子をThomsonパラボラ分析器を用いて計測した。この分析法は得られた飛跡分布から各イオン種の速度などのパラメータを求められるのはもちろん、全体の分布の特徴から加速機構の特徴を判断することも可能である。具体的には、各パラボラの原点に最も近い部分が原点を通る直線に乗る場合にはその加速は等速度加速であるとし、そして電場軸に垂直な直線上に乗る場合等エネルギー加速であると判断することが可能である。本実験においては飛跡の強度が低かったため、各パラボラは40ショット積算のデータである。パラボラ用電場は5kV/8mmで、パラボラ用磁場は約0.6 Tである。

電流方向に依存した電場による加速が主要な機構である仮定すると、イオンと電子はそれぞれ逆に加速されることになる。つまり電源極性を正負逆転させれば、加速イオンのパラメータは大きく変化すると予想される。そこで電源極性への依存性を観察するため、 $\pm 20\text{kV}$ で放電を行い、パラボラ測定から加速イオンのパラメータを測定した。正電源と負電源の結果を比較すると、各イオン種について両者はほぼ同様のエネルギー、速度を持ち、パラボラの空間分布についても大きな違いは見られなかった。ここで得られたパラボラの実験的特徴は2つあり、ひとつはイオン加速方向が電流方向に依存しないという点で、電流方向非依存な加速機構が支配的であるということを示している。もうひとつは最高速度領域の粒子が速度一定線上に乗るという点であり、等速度分布を作りうる加速機構を考える必要があるということを示唆している。これらの結果から妥当な候補として磁場による多段力学反射モデルを考えると、半径収縮する磁気壁と衝突により荷電粒子がLarmor軌道を描いて反射され、それが複数回起こることによって目的の速度まで加速される。これはもちろん電流非依存であり、磁気壁の軸方向速度が荷電粒子速度のひとつの上限となるので等速度加速の条件を満たすことになる。このモデルに関しては、Gureev(1980)の粒子シミュレーションの報告がある。このモデルは電流シートがロート状の剛体で模擬され、粒子と完全弾性衝突するモデルである。ただし物理的素過程として詳細な反射・加速過程を議論していないため、本研究においてその改良モデルの構築が試みられた。このモデルにおける反射機構は磁場を介しているが、純粋な壁と粒子との衝突と同じ形の加速であるため力学的であるといえる。一般に、静磁場は荷電粒子に対して仕事をしないが、時間変化する磁場は衝撃波に

乗った系から見れば、衝突方向に電場が存在していることと等価となる。その電流シートが粒子に対して仕事をし、複数回反射によってMeVオーダーまでイオンを加速させると考えることができる。

このモデルに基づくと加速粒子の最大速度は半径収縮する電流シートの速度の関数となる。電流シートの収縮速度は充電電圧によって変化させられるので、収縮速度依存性を観察するため、20kVと25kVで放電を行い、Thomsonパラボラ測定器で加速イオンのパラメータを計測した。その結果軸方向加速イオンの速度は20kV充電（~100kA）で2000 km/sec、25kV充電（~120kA）で2600~2700 km/secとなり、約1.4倍程度増加した。Zピンチプラズマ半径方向運動方程式から最終的な到達速度を計算した。本研究の20kV放電のAr⁺について注目すると、軸方向の最大粒子速度が2000km/sec、そのときの半径方向の最大収縮速度が190km/secと推定されるので、およそ壁の速度の10倍となっている。この10倍という加速効率もGureev(1980)でも指摘されている。このようにシミュレーションと実験において加速効率が一致しているということから、イオン加速について力学的加速機構の妥当性を支持しているものと考えられる。

イオン加速の一方で電子加速についても本研究において間接的な速度計測を行った。自己収縮プラズマにおける輻射は可視~X線領域に及ぶが、ホットスポットからの軟X線領域放射は局所的な高温プラズマ部の生成によるものであり、硬X線領域放射は電極(金属部)と電子の衝突による制動放射であると考えられている。入射粒子がイオンの場合には制動放射を放出するために必要な加速度が電子に比べて何桁も小さいので、制動放射は加速電子の存在を示唆する証拠となる。その硬X線放射を測定するためX線ピンホール撮像を行った。正電源と負電源でその像を比較すると、どちらにおいても0.5mmの銅板を透過するエネルギーを持った硬X線が観察された。これは正負両電源で電子加速の存在が示唆されたことを意味し、イオンだけでなく電子の加速も電流方向に依らない加速メカニズムが支配的であると考えられる。電子加速によって発生したX線は0.5mmの銅板を100%透過したとしてエネルギーの下限をX線吸収係数から推定すると、硬X線エネルギーの下限はおよそ100keVとなり、少なくとも100keVの加速電子が存在していることを反映している。

自己収縮系における粒子加速現象を宇宙線加速へ応用することを考える。自己収縮系における多段反射粒子加速は衝撃波Fermi加速の一形態として議論可能である。まず衝撃波Fermi加速が起こる条件を考えてみると、不連続な2つの速度を持つ乱流磁場境界面で多段反射されるような環境が必要である。この衝撃波Fermi加速のひとつの特徴として加速可能な下限の速度が存在するので、衝撃波Fermi加速が実現されるためにはもともとある程度のエネルギーを持った粒子が種粒子として必要となる。自己収縮プラズマにおける磁気壁による多段力学反射を省みると、衝撃波Fermi加速のように衝撃波面を横切る必要がないので、より低エネルギーの粒子でも加速可能であるという利点を持っている。宇宙線分野では衝撃波Fermi加速の主要な発生場所は超新星残骸(SNR)であるといわれている。この超新星残骸においてカニ星雲や白鳥座ループに見られるようなフィラメント構造が同時に存在しているような領域では、自己収縮系の加速とSNR衝撃波加速が同時に発生し、その環境においては自己収縮Fermi加速がSNR衝撃波Fermi加速の前段階の加速として存在するような環境を考えることが可能である。宇宙物理分野においてこの議論は入射問題として知られているが、他にも多くの代替加速モデルが提案されているのでそれらの中での比較が今後必要である。

最後に全体をまとめると、イオン加速については電流方向に依らずMeVオーダーの加速を観察し、電子加速については電流方向に依らず下限として100keV以上の加速を観察した。どちらも電流方向に依らないためこれまで定説であると考えられてきた電流方向に発生する電場による加速ではなく、磁気壁での多段反射による力学的反射が重要な加速機構であると考えられる。本研究で示した加速モデルが今後、超新星残骸などにおいて発生しうる粒子加速機構のひとつとして議論されることが期待される。