

発散型ガスパフ Z ピンチにおける高エネルギーイオン計測 Diagnostics of High Energy Ion in The Divergent Gas-Puff Z-Pinch

指導教授 高杉恵一

M9005 佐久間洋志

1. はじめに

プラズマは電離したガス状の物質で容易に変形する。プラズマに大電流を流すと $J \times B$ ローレンツ力で自己収縮(Z ピンチ)を起こす。プラズマは衝撃波を伴って収縮し中心軸上で衝突する。このときホットスポットという高温高密度の軟X線源が生成される。通常の Z ピンチではホットスポットは軸上に点在する。

ガスパフでプラズマフォーカスのような強いピンチを起こす目的で、ガス噴出角度を変えた発散型 Z ピンチ放電実験を行った[1]。発散型 Z ピンチでは Anode 側に局所的なホットスポットができる。このとき、軟 X 線とは別に Anode 表面に従来型ではみられない硬 X 線が観測された。この硬 X 線は高速電子が Anode 先端部の金属に衝突して起こる制動放射が原因である。発散型 Z ピンチ放電ではエネルギー 200~250keV の硬 X 線が観測され、高エネルギー電子が存在することが分かっている。

本研究の目的は高エネルギー電子に対応したイオン加速の確認、イオンの種類やエネルギー等の特定、加速機構の理解である。そのためにトムソンパラボライオン分析器を作製してイオン測定実験を行った。

核融合研究で用いられるプラズマフォーカス装置ではイオンビームが観測されており、ビームによって核融合反応が起きている。発散型ガスパフ Z ピン

チは軸方向の非一様性が本質であり、非一様な自己収縮系の共通の理解につながると期待される。

2. 実験装置

トムソンパラボラはイオンを電場・磁場で偏向させて分析する装置である(図1)。z 方向の電場・磁場中に x 方向からイオンが入射すると、電場によって z 方向、磁場によって y 方向に曲げられる。その結果、検出器上では同種イオンは放物線の飛跡を描く。これをパラボラと呼ぶことにする。そのパラボラからイオン種やエネルギーがわかる[2]。

検出器上でのビームスポット径を制限するため、二重のピンホールを用いている。数百keV~数MeVのエネルギーをもったイオンが飛んできていることを考慮して、電場電極には10kVまでの電圧をかけられるようにした。電場電極の陽極側に+3.5kV、陰極側に-3.5kVをかける。磁場は鉄心にコイルを巻いた電磁石で発生させる。コイルは300巻きとした。パルス的に100Aの電流を流すと、放電時に0.39Tの磁場が発生する。

図2は実験に用いた日本大学SHOTGUN-IIIガスパフ Z ピンチ装置の概略図である。コンデンサ容量12 μ F、充電電圧20kV、電極間隔はともに30 mm とした。ガスは5 気圧のAr+Ne+Kr(90:5:5)の混合ガスで、発散角度10° とした。Cathodeの下流側にトムソンパラボラを配置し、軸方向に飛んでくる粒子の分析を行った。

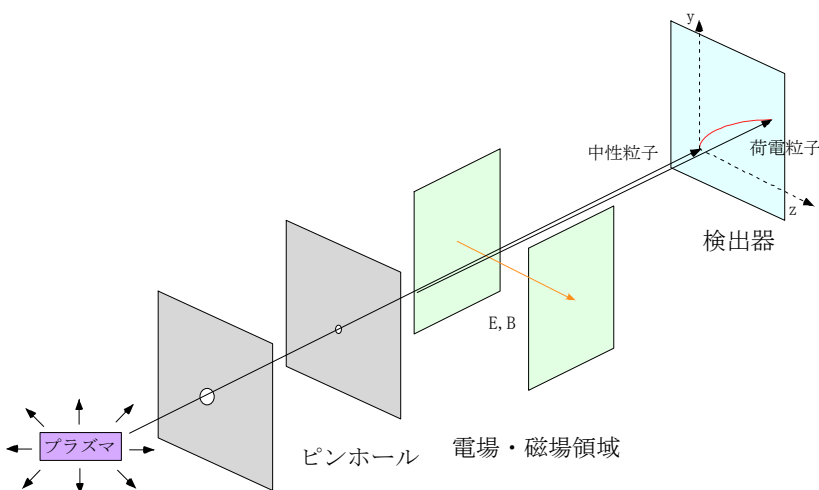


図1. トムソンパラボラの概念図

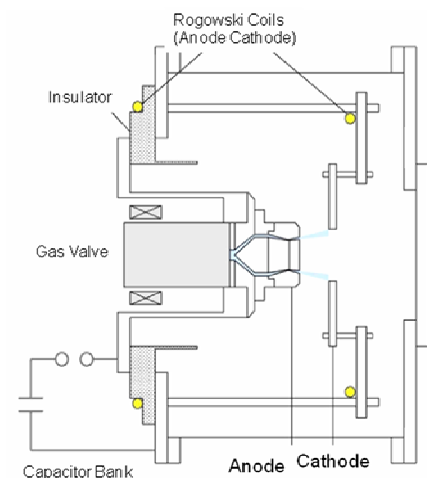


図2. ガスパフZピンチ装置

3. 実験結果

発散型ガスパフZピンチ放電から軸方向に飛来する粒子をトムソンパラボラで測定した。図3は40ショットの放電で得られた飛跡で、四本のパラボラが観測された。図に示した0点は電場・磁場によって偏向されない中性の粒子であり、これは原点である。z軸は電場のみをかけたときの粒子の跡、y軸は磁場のみをかけたときの粒子の跡である。このとき電場電極に7kV、磁場電極に0.39Tが加えられた。

各パラボラの最大エネルギー部分をそれぞれA、B、C、Dとした原点からの偏向距離z[mm]、y[mm]から求めた各点の速度、エネルギー/電荷、運動量/電荷、質量電荷比を表1に示す。質量電荷比からイオン種を計算するとAはAr⁺、BはNe⁺、Ar²⁺、CはAr³⁺、DはNe²⁺となった。

この実験でイオンの最大エネルギーは1.0MeVを観測した。各パラボラの最大速度は、A、Cのパラボラが 2.2×10^6 m/sでほぼ等速度となり、B、Dのパラボラが 2.4×10^6 m/sでほぼ等速度となった。BのパラボラはAr²⁺とNe⁺が重なっているが最大エネルギー部分であるB点は速度の違いからNe⁺である。Krのパラボラはなぜか検出されなかった。

4. 考察

同種のイオンが電荷によらず等速度であるのは、もともと同一価数で飛んできたイオンが検出器に到達するまでに中性ガスと衝突することによる荷電交換が起こり、電荷が変化して他の価数のパラボラを描いた可能性がある。

荷電交換が起こる前のイオンの価数は、コロナ平衡モデルを仮定するとプラズマ収縮開始時の5eV程度ではAr³⁺とNe²⁺が支配的である。つまりプラズマからはAr³⁺、Ne²⁺が飛んできて、荷電交換によって一部がAr²⁺、Ar⁺、Ne⁺となって図3のパラボラが得られたと考えられる。

質量によって速度に若干の差が出るのは、Ar³⁺とNe²⁺のラーマー半径の違いからプラズマ中で発生する電場の受け方が違うと解釈できる。ラーマー半径はAr³⁺のほうがNe²⁺よりも大きく、加速領域から遠くなりえるので、Ar³⁺よりもNe²⁺のほうが速くなっている。

5. まとめ

トムソンパラボラ装置を作製し、発散型Zピンチから軸方向に飛来してくるイオンを測定する実験を行った。

この実験でMeVオーダーのArとNeのイオンを観測した。Ar⁺、Ar³⁺はほぼ等速度となり、Ne⁺とNe²⁺はほぼ等速度になった。

電荷によらず速度一定になったのは荷電交換によってAr³⁺、Ne²⁺の電荷が変化したためだと考えられる。

質量によって速度が若干違っているのはラーマー半

径の大きさによってプラズマ中で発生する電場の受け方が違ってくことから、電場によって加速される速度に差が出ると解釈できる。

今後の課題として、荷電交換が起こらないように差動排気したArガス放電実験が必要である。また、得られたパラボラの線が太いので精密な測定をするためにピンホールを小さくする必要がある。

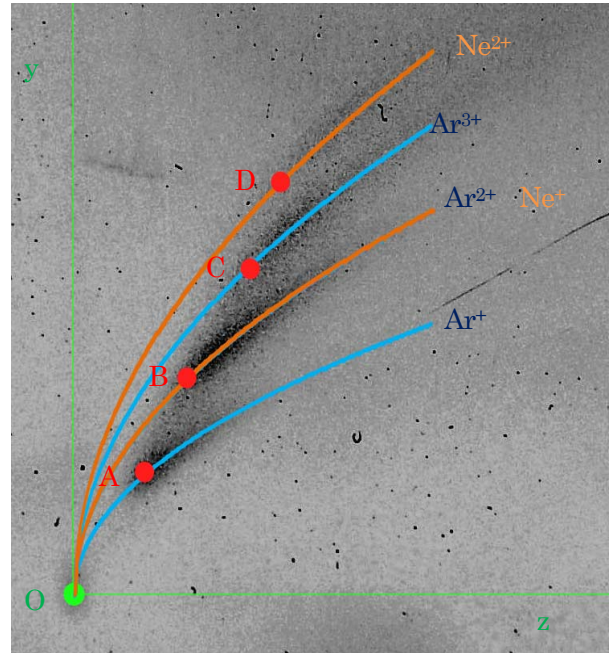


図3. 発散型ガスパフZピンチ放電の検出面

表1. 最大エネルギー部分のパラメータ

パラメータ	A	B	C	D
電場による 偏向距離z[mm]	3.4	5.5	8.9	11
磁場による 偏向距離y[mm]	5.5	9.3	14	18
速度 $v \times 10^6$ [m/s]	2.2	2.4	2.2	2.4
エネルギー/Z [MeV]	1.0	0.58	0.34	0.30
運動量/Z [kg m/s]	0.92	0.49	0.31	0.25
質量電荷比 A/Z	40	21	14	11
イオン種	Ar ⁺	Ne ⁺	Ar ³⁺	Ne ²⁺

5. 参考文献

- [1]K.Takasugi and E.Kiuchi, Plasma Fusion Res. **2**, 036 (2007).
- [2]M.J.Rhee, Rev. Sci. Instrum. **55**, 8, pp.1229-1234(1984).