

氏 名	石 井 慶 之
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	論 理 博 第 281 号
学位授与の日付	昭 和 44 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Spectroscopic Studies of a Helium Plasma in a Linear Z-Pinch Tube

(直線 Z ピンチ放電管におけるヘリウムプラズマの分光学的研究)

論文調査委員 (主 査) 教授 中井祥夫 教授 巽 友正 教授 端 恒夫 教授 田中茂利

論 文 内 容 の 要 旨

出願論文は直線 Z ピンチ放電によるプラズマの生成機構とプラズマ自身の物性的性質を分光学的測定により研究したものである。とりあげられた分光学的現象はヘリウムプラズマより発する近赤外域より近紫外域にわたる連続スペクトルと強い禁制線スペクトルである。これらの定量測定により Z ピンチプラズマの生成過程とプラズマ物性の解明が試みられている。

ピンチ放電は1950年頃より制御熱核融合反応実現の一方法として世界各国で研究され始めたが、プラズマ固有の不安定現象に逢着し、研究の方向はプラズマと磁場との相互作用という電磁流体力学の問題へ移っていった。これらの実験はすべて低いガス圧 (0.1mmHg以下) で行なわれていた。出願者は必ずしも核融合実験ということにはとらわれることなく、より高いガス圧においての放電実験をも行ない、ピンチ効果の機構はガス圧に大きく依存することを明らかにした (参考論文 4 参照)。

本論文は参考論文 4 で明らかにした Z ピンチ機構のうち衝撃波収縮機構の領域におけるピンチ機構とその分光学的研究を行なったものである。ヘリウムガスの場合はこの圧力領域は 3~6mmHg である。始め円筒放電管の周辺で起こった放電が放電自身とその発生磁場との相互作用で管軸の中心に向かった収縮力をうける。この強い力のため衝撃波が発生し放電アークより先行して中心軸に向かって収縮し軸上で衝突する。この際、圧縮されたガスの一方向運動は軸上で熱化する。このため高温、高密度のプラズマが得られる。このプラズマは電流を運んでいないから電磁流体力学的不安定性をもたない。最大収縮時のプラズマは強い連続スペクトルを放射する。この時、プラズマの形状は軸方向に長くのびた円筒形となっており、それについて軸方向と直角方向の両方向から連続スペクトル波長分布および吸収係数を測定した。その結果、軸方向観測では光学的に充分濃厚であることがわかり、従ってプランクの黒体輻射の分布と対比することが可能となった。これにもとづいて近赤外 (1.0μ) より近紫外 ($2800\text{\AA}$) にわたる相対強度分布から温度として $(1.5 \pm 0.2) \times 10^4 \text{K}$ が得られた。次いで、直角方向の測定よりプラズマ柱の直径を 2mm とおいて 1.00μ における吸収係数として $5 \sim 8 \text{cm}^{-1}$ を得た。前者よりの温度測定値と併わせて電子密度として $5 \sim 7$

$\times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の値を得た。連続スペクトルの放射係数として自由—自由遷移のみならず自由—束縛遷移の寄与をも考慮し、イオン化ポテンシャルの低下および線巾の広がりによる実質的ポテンシャルの低下も計算の際に含められている。なお計算は水素の波動関数を出発点として近似している。

プラズマは最大収縮後、それ自身のガス圧および反射衝撃波の影響で空間的に広がり、密度の減少することが予想される。実際最大収縮時は殆んど連続スペクトルのみが観測されたが、 $1 \sim 2 \mu\text{sec}$ の後には広がったスペクトル線が観測された。各スペクトル線は広がりを持っており、また、禁制線も出現していることが観測された。各スペクトル線のずれ、禁制線の出現はシュタルク効果に基づくものと考えて、詳細に計算した結果を実験と対比した。禁制線は数多く観測されたが、特に $4^3\text{L} - 2^3\text{P}$ シリーズについては詳しく定量測定を試みている。このうち $4^3\text{p} - 2^3\text{p}$ の遷移に基づくスペクトル線のプラズマ中での定量測定は本研究ではじめてとりあげられたものである。これらの測定の結果、最大収縮後 $2 \mu\text{sec}$ 間に電子密度が 10^{17}cm^{-3} に減少していることが判明した。

初期充填ガス圧 6mmHg のとき中心収縮衝撃波によって直径 7.6cm の放電管中にあったガスが直径 2mm まで圧縮されたとすると中性ヘリウム原子密度は $3 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ になる。この時温度が $1.7 \times 10^4 \text{K}$ に上昇していたとすると電子密度は Saha 式より $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ になっていると計算される。一方、連続スペクトル輻射および吸収係数の測定から得た値は $5 \sim 7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ である。両者の差違は (1) プラズマ柱は一様であるとしたが、半径方向に温度勾配・密度勾配があり得ること、(2) プラズマは完全な熱平衡にあるとしたが、必ずしも完全平衡ではないこと、等が考えられる。これらの差異にも拘わらず、プラズマはかなり高密度状態であることが今回の実験で明らかにされた。なお、本論文は主としてヘリウム 6mmHg についてであるが、衝撃波圧縮機構の最低ガス圧である 3mmHg の場合は更に温度が高く、従ってより高い密度であることが示されている。

論文審査の結果の要旨

プラズマの実験的研究には種々の方法があるが、直接プラズマ内に探針を挿入する方法よりも内部に擾乱を与えないプラズマからの輻射を測定する方法の方が望ましい。高温プラズマではあらゆる波長の電磁波が輻射されているので、プラズマの理解のためには各波長のスペクトルを調べることが必要である。また実験室内で、テストプラズマをつくり出す方法も数多くあるが、このうちピンチ放電によって比較的容易に高温高密度のプラズマをつくることができる。

申請者は、従来行われてきた直線 Z ピンチ放電におけるガス圧を更に高い方へと拡張し、ピンチ効果がガス圧によって 3 つに大別されること、およびそれらの機構の解明を行ってきた。すなわち低ガス圧では雪かきモデル、中ガスでは衝撃波モデル、高ガス圧では基本的には衝撃波モデルでよく説明されることを明らかにした（参考論文参照）。衝撃波モデルの特徴は放電アークと衝撃波が明瞭に分離されていることであるが、このことについては申請者は参考論文 1 において 1 次元的に伝播する場合について明らかにした事実を 2 次元的構造に拡張し適用している。

申請者はこの結果をふまえて直線 Z ピンチ放電の衝撃波機構領域のヘリウムプラズマにつき、最大収縮時の連続スペクトルおよびそれに続く数 μsec 間に見られる禁制スペクトル線の強度とずれからプラズマの

電子密度と温度を決定している。連続スペクトルは近紫外 (2800Å) より近赤外 (1.0μ) にわたる強度分布を測定しているが、特に紫外域では手軽な標準光源がないにも拘わらず炭素電弧を試作した上でそれを用いて定量測定を実施している。この方法は他の分光学的物性研究に必要な紫外連続光光源としての応用の可能性を示したものとして重要である。

申請者が本研究でとりあげた分光学的対象としては上記連続スペクトル以外に禁制線の観測がある。禁制線の出現および許容線も含めてのスペクトル線のズレはシュタルク効果によるものであり、申請者はこれらにつき最近のデータを使って詳しく計算し直して解析を行なっている。プラズマからの輻射で 4^3P-2^3P 遷移に基づく禁制線を観測し、そのプロファイルを定量的に測定したのは申請者がはじめてである。また、本研究により、最大収縮時のプラズマの電子密度と温度、およびこれに続く数 μsec 間の電子密度測定により直線Zピンチプラズマの機構と生成されたプラズマの性質を明らかにすることが可能になった。

以上述べたように、出願者の研究は従来殆んど行なわれていなかった高密度プラズマの光領域輻射の研究を行なうことによって直線Zピンチ機構を明らかにするとともに高密度プラズマの光領域輻射そのものについても新しい知見を加えているものであって、プラズマ物理学乃至プラズマ分光学の発展に貢献するところが少なくない。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値があるものと認める。