

氏名	あおき じゅん 青木 順
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人博第 376 号
学位授与の日付	平成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	人間・環境学研究科 関連環境学専攻
学位論文題目	強磁場中に孤立した非中性プラズマの熱平衡現象に関する実験的研究

論文調査委員 (主査) 教授 際本泰士 教授 宮本嘉久 教授 阪上雅昭

論文内容の要旨

同一符号の電荷を持つ粒子の集団を非中性プラズマと呼ぶ。電子のみで構成された純電子プラズマはその代表である。このプラズマは外場により孤立して拘束された環境のなかで、熱平衡状態に入り、更に緩やかに熱的に緩和する。その過程を、実験的に検証することが本論文の主題である。そのためには、従来の実験技術を超えて、新しい手法を考案する必要があった。本論文では、著者が開発した新しい実験技術、その成果として新たに得られた物理学的知見について報告している。

第 1 章では、従来の研究を概括して、本研究課題の位置づけと本論文の構成について記述している

第 2 章では本研究の基盤となる、孤立した純電子プラズマ系の形成とその保持について、実験装置の構成とその特徴を記述している。大量の電子を有限の空間に閉じ込めるために、最大で 2.2T の一様な強磁場を超伝導マグネットにより発生し、磁力線に巻き付いた電子が、反発しあい磁力線方向に逃げ出すのを、放物線形の静電位分布の谷に捕捉する。この電位分布を、外部に設置した電子源からトラップへの電子導入に必要な電位分布の動的変化に対して、維持するために、著者は新しい操作法を考案した。設定した時刻に至り、電子密度分布を計測するには、電子源と反対側の電位障壁の高さを減らして、それを乗り越えた電子を磁力線に沿って抽出する。電子は 5kV の加速領域を通過させた後、蛍光面に衝突させる。この衝突で発生した蛍光強度の二次元分布は各磁力線に沿って積分された電子密度に比例する。

第 3 章では、真空容器内に発生した上記の発光分布を、如何にして高い空間分解能を持ち、広い強度変化に対して優れた線形応答で、感度良く数値データに変換するか、について記述している。蛍光面上の発光像を 1.2m 離れて置かれた 2048x2048 のピクセルを持つ CCD カメラまで、輝度の減衰を避けて伝送するために、著者は大口径のアクロマティックレンズからなる光学系を開発した。この観測系で得られた画像データでは、最高 16 ビットに達する発光強度の全域に渡って電子数との比例関係が確認された。この新設の光学系では、60mm 四方の視野を確保したうえで 35 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ の空間解像度が実現された。更にズーム機能を付加して、視野を狭くした場合には、分解能は 8 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ にまで向上した。

第 4 章では、磁気軸と円筒容器の中心軸を、如何に高精度で一致させるかについて報告している。両軸にズレがあると、電子軌道が不安定になって閉じ込め性能が劣化する要因となる。著者は、電子が磁力線に沿って高速に移動する軸方向特性と、電位障壁に挟まれた時は糸状の電子群が容器の壁と平行に回転する周方向の渦特性を組み合わせ、軸ずれを高感度で評価する新しいアルゴリズムを考案した。この手法は第 3 章に報告された、高性能の画像計測法と連携することによって機能する。装置要素の外形から 0.5mm の精度で軸合わせしても、実際は 3mm ほどのずれが存在していたことが新手法により判明した。この検出法を併用して位置調整を繰り返すことにより、角度のズレが 0.0125 $^\circ$ 、位置のズレが 0.0816mm の精度で両軸は一致した。この到達精度は、超伝導電磁石に既設の調整器の動作分解能によって制限されており、検出精度としては更に 1 桁上回る能力がある、と著者は主張している。

第 5 章は本論文の中核部である。まず著者の考案した軸合わせ法を適用して、装置の閉じ込め性能が大きく向上したことを、定量的評価を添えて示している。その上で、強い磁場の中に孤立して閉じ込められた純電子プラズマが熱平衡分布に至

り、放射冷却等によって次第に低温化するとともに3次元の空間分布がどのように変遷して行くかについて記述している。

ここで鍵となるのが、二次元の画像分布から三次元の空間分布を決定する手法の確立である。従来の手法は、無限空間に孤立し温度が零度の極限にある仮想的な非中性プラズマについて解析的に得られた理論モデルに依存していた。現実の実験条件を考慮しようとする、偏微分方程式を数値的に解く必要があり、膨大な計算時間の割に空間的な分解能は低かった。著者は二次元画像データを適切な直交関数系で展開することで、境界条件を自動的に満たしたまま解析的に積分する手法を導入した。この手法で得られる自己ポテンシャルと外場のポテンシャルとを重ね合わせて合成ポテンシャルを作り、それに対する Boltzmann 平衡を磁場方向の密度分布に適用することで軸方向の空間分解機能を得る。著者は緩和法を加味した逐次近似法によって三次元の密度分布と電位分布を自己無撞着的に導き出し、従来の数値解法に比べると50倍以上の高速化と高い空間分解能を可能にした。その直接の成果として熱平衡分布の形成に伴い、初期分布からの残余成分が希薄なハロー分布として赤道面の周辺に突出することを見だし、その起源について検討した。

著者は、この高精度で得られた平衡電位分布の半径方向依存性を利用して、新しい温度計測法を考案した。トラップに閉じ込められた電子から見ると、外場による電位障壁の高さは半径方向に変化する。従って、障壁を下げた時、流出する電子数の半径方向分布は、電子のエネルギー分布を反映したものである。この点に着眼して著者は、抽出を全粒子の1%以下に抑えた微量分析によって電子温度を評価した。その解析によれば、電子温度は当初の1eVから室温の約2倍の0.05eVまでサイクロトロン放射によって緩やかに冷却されて行く。

第6章では本論文を総括している。

論文審査の結果の要旨

宇宙物質のほとんどを占めるプラズマが電気的に中性な状態にあるのに対して、本論文で取り扱う非中性プラズマは正または負のみの電荷の粒子から構成された状態にある。反対電荷による遮蔽が無い、粒子間の相互作用は遠方まで広がる。このため非中性プラズマの緩和過程においては常に全ての粒子が系全体の動力学に関わるという特徴がある。この特性は重力系と共通しており、熱平衡に基礎を置く従来の統計力学に新しい視点を求める契機ともなっている。著者が属する研究室では、電子のみで構成される非中性プラズマ（純電子プラズマ）を用いて、孤立した熱平衡系をデスクトップのスケールで作成し、その物性を検証する計画を進めて来た。その研究活動のなかで著者は、実験装置の幾何学的構造の高精度設定・二次元画像計測の細密化・大容量画像データから三次元分布を導出するための高精度高速数値解析法等、基盤技術の高度化を分担した。更に、その成果を基にして、純電子プラズマの孤立した熱平衡分布に関し、以下のような新しい知見を得るに至った。

[1] 高感度画像計測系の開発（第3章）:

純電子プラズマの研究においては電子密度分布の高感度・高分解度計測が基本である。著者は数値解析を駆使してその設計に取り組んだ。手製の装置に対して、実験的調整を組み合わせ、電子数に比例した蛍光分布を、歪みのない画像として Charge-Coupled-Device (CCD) カメラの検出面まで伝送する、明るい光学系を作り上げた。その結果、プラズマ断面における 2048x2048 の地点で、電子数の分布を数個の刻みで決定できる高感度の計測系の実現に至った。この計測能力は非中性プラズマ科学の分野では画期的なレベルに達し、この計測系で記録された渦の画像に出現した構造の緻密さは、渦の動力学に新しい視点からの解析を呼び込む契機となっている。

[2] 電子渦科学の高精度軸合わせ技術への適用（第4章）:

著者は電子渦の特性を応用して画期的な軸合わせ技術を発明した。非中性プラズマの熱平衡緩和の検証には長時間に渡り粒子を閉じ込めることが不可欠であるが、この保存性の実現には、磁気軸と容器軸とが一致して閉じ込め環境の軸対称性が確保されることが前提となる。しかしながら、超伝導磁場コイルが製品として熱絶縁ケースの中に収納された場合、外部から磁気軸の位置を mm 単位以下で幾何学的に決定することは難しく、軸ずれの大きさを定量的・客観的に評価することは極めて困難である。したがって従来は、後続の実験成果を総合的に解析するなかで、間接的に評価する方法に頼っていた。つまり、軸合わせの過程で、その作業を収束させるためのデータがないという矛盾がついてまわっていたのである。著者はこの悪循環を断ち切り、軸合わせを独立な操作として、従来にない高い精度で達成する途を切り開いた。この成果は、その

まま本論文に記述された物理学実験の質の向上に貢献している。

[3] 純電子プラズマの3次元平衡分布の実験による決定と温度評価（第5章）:

閉じ込め特性が向上した純電子プラズマを高感度で計測した実験データから3次元密度分布を高速で決定する手法を開発したことが著者の3番目の成果である。この手法によれば、空間変化の大きさに応じて格子点の粗密を調節して、実験データを直交関数の級数で表すことにより、偏微分方程式を代数計算として高速で解くことができる。この結果、極めて高い数値的精度をもって3次元分布の導出に成功した。その一例がプラズマ中核部の周辺に発生するハロー分布の検出である。計算時間の大幅な短縮の結果、この解を次のステップの解析に利用できることとなり、高次のデータ解析が可能となった。その利点は、微量の抽出によって電子温度を評価するという新しい計測法の発見につながり、温度が室温近くまで緩やかに低下するという従来の限界を超えた観測に成功した。

以上のように、申請者は新しい実験技術を創案して、保存性の高い純電子プラズマ本来の特性を実現し、計測に伴う摂動を最小限度に抑えることにより、実験の信頼性を高めることに大きく貢献した。その上で高分解能で得た画像データを高速で処理して、微細な3次元構造の存在の同定に成功した。これらの成果は非中性プラズマ科学の分野に広く共有され、実験研究の促進に大いに益するものと期待される。これらのことから、本学位申請論文は、物質自然界の安定構造形成の機構解明を創設の課題とする、相関環境学専攻物質相関論講座にふさわしい内容を備えたものと言える。

よって、本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年2月5日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。