

氏名	三 瓶 明 希 夫
学位の種類	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人博第 239 号
学位授与の日付	平成 16 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・環境学研究科人間・環境学専攻
学位論文題目	Experimental Study of Formation of a Vortex Crystal Cell in a Nonneutral Plasma (非中性プラズマにおける渦結晶形成の実験的研究)
論文調査委員	(主査) 教授 際本泰士 教授 宮本嘉久 助教授 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る非中性プラズマを、一様な磁場に沿う方向に置かれた 2 箇所の電位障壁の間に置くと、長時間の閉じ込めと高度の分布制御が可能となる。ここで磁場強度を高めて電子の旋回半径を注目する空間スケール長より小さくすると、電子の集団は非圧縮性の二次元完全流体として振る舞い、電子密度と過度、等電位面と流線がそれぞれ比例する。本学位申請論文は、この特性を利用して、二次元の渦運動において対称性の高い結晶構造が自発的に形成される現象の物理機構を、単純化した配位で実験的に論じたものである。

第 1 章では純電子プラズマの流れと二次元完全流体の等価性について記述している。その考え方に従い、実験研究において純電子プラズマの巨視的運動が二次元渦と等価であることを主張するために満たすべき実験条件を議論している。

第 2 章では現実の実験において、純電子プラズマを閉じこめる装置の構造と機能、および純電子プラズマで渦糸や連続分布の背景渦を生成する手法について記述している。本論文で採用した実験手法は申請者がグループ研究の中で開発した独自のものである。過度分布は蛍光の輝度分布として、最大 $512 \times 512$ の格子位置における 16 ビットの数値データ形式で記録・保存される。輝度分布を電子度分布に変換し、それを更に過度分布と流れ関数として表現するためには、いくつかのステップが必要であるが、そのために開発したデータ処理法と高速の数値解析のアルゴリズムを記述している。

第 3, 4, 5 章は本申請論文の中核をなす実験的成果を記述している。第 3 章の主題は、孤立した渦糸がさまざまな初期分布から緩和し、規則的な配列の「渦結晶構造」の形成に至る過程の代表的データを提示し、後続の各章で展開する枠組みを示すことである。まず、中空円筒状の初期分布から不安定なパターンを持つ集団運動が成長し、非線形過程により数本の紐状の渦糸が発生すること、それらが合体しながら減数して 4 本になると、渦糸が長寿命の対称構造を作る現象を報告して、渦糸のダイナミクスとその間の空間を埋める背景渦の役割を指摘している。申請者はその上に立って、渦運動における 3 つの基本過程の重要性を提示している。

基本過程の第 1 として 1 本の渦糸に注目し、それ以外の渦の効果を平均して背景渦としてみなすと、この渦糸は背景渦の勾配を登ることを実験的に示した。第 2 の基本過程は渦糸間の相互作用である。2 本の渦糸が近づいた場合、両者は急速に合体するか近距離で渦対を作るか、のいずれかに落ち着く。この分岐において重要な役割を果たすのが、渦糸の周りに形成される過度の低い溝 (ring hole) である。合体か否かは ring hole が 2 本の渦糸間に充分深く形成される前に両者が近接するか否かできまることが申請者等の実験で明らかとなった。第 3 はこの ring hole の形成に要する時間の定量的評価である。この過程については理論的予測が全く存在しないため、申請者は計測結果を複数の物理量に依存するべき関数とみなして、多変数回帰解析を適用し、現象と良く一致する実験式を導出した。その関数は、渦糸と背景渦の総合的強度に依存して分岐特性を示す興味深い形をしている。

第 4 章の主題は、渦の結晶構造の単位胞となる正三角形の配位を 3 本の渦糸が安定に形成するうえで、背景渦が担う役割を実験的に検証することである。申請者は、初期位置が正三角形に設定されていても、背景渦無しでは、3 本の渦糸の相対

位置はばらばらになってしまうのに対して、背景渦があると、任意の初期分布から急速に正三角形の構造に至ることを示した。しかも渦糸の循環強度が不揃いであっても、各渦糸の周りにその循環にほぼ比例した負の循環を持つ ring hole が自己形成され、相対位置が正三角形の頂点となることを指摘した。更に対称指標  $S$  を新たに導入してこの過程を定量化した。この指標は最高の対称性を持つ正三角形に対して最大値 1、渦糸が直線に並んだ時に最小値 0 となる。 $S$  は力学が支配的な初期時間帯では大きく振動するが、その後  $S > 0.9$  が維持される対称性の高い状態に至るまでの時間は背景渦の循環が高いほど短くなる。即ち対称形の単位胞を形成するために背景渦が果たす積極的役割が明瞭となった。渦糸の速度の揺動は三角形の時間的変形の原因となる。揺動の速度がゼロになれば単位胞の形状は維持される。申請者はこの揺動速度の減少と対称指標が強い相関を持つことを実験的に示し、背景渦によって渦糸運動が冷却されることを定量的な関係として表した。

第 5 章の主題は、本実験研究の結果から既存の渦糸理論を批判的に検討することである。渦糸が導体壁に囲まれていなければ、不揃いの循環を持つ渦糸でも、いったん正三角形の頂点に置かれると、その位置に留まるという Aref の理論が知られている。その一方で導体壁は正三角形を成す渦糸の配列を破壊するとする O'Neil 等の理論がある。申請者は背景渦が無ければ後者の理論のごとく三角形は不安定であることを指摘した。更に背景渦の中に ring hole が形成されて、渦糸の裸の循環値を部分的 (20%以下) に遮蔽すること、そして理論的には予測されていないほどの強さで、壁の不安定化効果を抑制することを示した。

第 6 章では、渦結晶形成の理論検討のためにしばしば適用される変分原理において導入されるいくつかの積分量について、その保存性を実験的に検証している。実験結果はエンストロフィー、エントロピー、角運動量、エネルギー、粒子数 (循環) の順に保存性が強まることを示す。従って、諸々の理論解析において、他の積分量が保存するとしてエンストロフィーまたはエントロピーの極値条件を求める選択緩和の仮説は正当化される。しかし緩和過程における変化量に対する寄与は、自由度の大きい背景渦からよりも通常は固いと仮定される渦糸の変型からのほうが大きいことが実験的に判明した。申請者も認めるようにまだ実験面の精緻化が必要であるが、これほど単純にモデル化された多粒子系における渦の構造形成についても、物理的説明を進めるには、実験と理論の間に更に緊密な連携が必要であることを示している。

以上のように、本申請論文は、理想的な流体特性を純電子プラズマにおいて実現し、渦運動とそれに伴う構造形成に関する未解決の領域を実験的に解明しようと試みたものである。その結果、新しい局面をいくつか発見している。

## 論文審査の結果の要旨

自然の中で我々が強く認識するのは、多数の粒子が集まって形成する、規則性・対称性の高い構造である。通常物質の構造形成には階層的な結合力が介在しているが、本学位申請論文においては、自由電子が相互にクーロン力を及ぼし合う単純な多粒子系を取り扱っている。特に電子が非平衡状態にある初期密度分布から集団的な渦運動を引き起こし、自発的に対称性の高い構造を形成する現象の基礎課程を実験物理の立場から検討している。

渦は我々の日常生活において身近な現象であり、その概念は古くより文様・象徴・隠喩として文化活動にも入り込んでいる。その一方で渦の特性は理想化され、数学的に抽象化された形で物理学上の重要な概念ともなっている。渦運動記述の原初は流体力学にある。流体の運動を記述する方程式を解析的手法で解くことは大変難しく、長い歴史にも拘わらず、運動方程式に含まれている豊富な内容はまだ汲み尽くされていない。理論的には散逸が限りなく小さい非圧縮性の理想流体を想定して、流体運動の華とも言える渦運動の特質が議論されて来ている。しかし混沌とした渦の中から多数の渦糸が規則的に配列した「渦結晶」と呼ばれる状態が出現するとは、磁化された電子の集団である非中性プラズマの実験で発見されるまでは予想もされていなかった。

本学位申請論文は 1995 年に米国カリフォルニア大学サンディエゴ校で発見された「渦結晶」の発現機構を基礎過程から段階的に解明することを目標とした研究過程の一里塚となるものである。先行実験においては、このように緻密な検討を行うことは不可能であった。その理由は、(1) 電子密度が渦門巻き状の初期分布から不安定な集団運動 (Kelvin-Helmholtz 不安定性) が誘起され、その結果密度分布が多数の紐状に分裂する過程を渦糸の形成に利用しているため、実験の再現性が悪く、緩和過程を時間的に追跡することができないこと、(2) 現象に関わるパラメータを独立に制御できないため支配的な素過程を同定するのが困難であること、の 2 点にあった。これに対して、申請者の実験においては、初期条件として渦糸の本

数、位置、強さ（循環）を外部から与えること、加えて渦糸の間隙を埋める背景渦の循環と空間分布も同様に設定できると、革新的な特長である。この新しい実験技術によって、個々の渦糸の運動、渦糸2本の間相互作用、多数の渦糸で作られる平均場の中の渦糸の運動等々、渦運動における基本的な物理過程を解析しやすい配位で再現良く観測することが可能となった。

本申請論文にて報告された研究成果は、次の5項目にまとめることができる。

(1) 再現性良く制御されたさまざまな空間分布の渦糸をすることにより、孤立した渦糸が非平衡状態から緩和する過程で規則的な配列の「渦結晶」が形成されることを示した。先行実験と同様に不安定な初期分布から発生した渦糸でも、初期分布を指定した渦糸でも、渦結晶が発現することは共通している。そのパターンも渦糸の本数に対応して決定される。しかしながら、どの本数の渦結晶が準定常的に形成されるかは、渦糸の間隙を満たし空間的な揺らぎを持つ背景渦の分布に強く影響を受ける。(第3章)

(2) 渦糸間の二体相互作用において強く影響するのは渦糸の周りに形成される環状の空乏領域 (ring hole) である。申請者は単独の渦糸と背景渦との相互作用によってこの環状構造が形成されるまでに要する時間を記述する実験式を導出した。(第3章)

(3) 渦結晶の単位胞を形成するには少なくとも3本の渦糸を必要とする。申請者はさまざまな分布を持つ背景渦の中で、3本の渦糸の運動を詳細に計測して、背景渦は任意の初期位置に置かれた渦糸を正三角形の頂点の位置に移動させ、しかもその対称性の高い配位を準定常的に維持する働きを持つことを定量的に示した。更に、渦糸が対称位置に落ち着くまでに要する時間は、背景渦の循環が大きいほど短くて、分布の微細な構造には強く依存しないことを示した。(第4章)

(4) 既存の理論によれば、対称的な渦糸の配位は、境界壁がなければ維持される。しかし実験では不可避免的に境界壁があるから、鏡像渦糸の効果によって渦糸の対称配位は不安定になると予想される。これに対して申請者の実験は、裸の渦糸系は確かに不安定であるが、背景渦は壁による不安定化効果を抑制して、対称配位にある渦糸の相対位置を保つ働きを持つことを示した。(第5章)

(5) 対称性の高い構造形成の理論解析において採用される、いくつかの積分量を実験的に評価して、その保存性の強さの序列を示した。通常極値化の対象となるエントロピーとエントロフィーの緩和は確かに速いけれども、変化が速いのは背景渦ではなくて渦糸の変形に由来する成分であること、従って統計的な緩和理論だけでなく力学的検討も加えねばならないことを示した。(第6章)

以上のように本研究は宇宙や地球の気圏・水圏のダイナミクスに極めて重要な役割を果たしている渦の構造形成の物理過程に対して、独自の視点から実験的検討を行ったものであり、従来の認識を更に深める学術的成果を示している。このことから、本学位申請論文は人間・環境学専攻自然・人間共生基礎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16年2月9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。