

Malmberg-Penning トラップに閉じ込められた 2本の電子渦の初期状態の精密制御手法の開発

1. 発表者

小川瑛仁（京都工芸繊維大学 工芸科学研究科 博士前期課程（電子システム工学専攻））

中島雄太郎（京都工芸繊維大学 工芸科学研究科 博士後期課程（電子システム工学専攻））

三瓶明希夫（京都工芸繊維大学 電気電子工学系 准教授）

比村治彦（京都工芸繊維大学 電気電子工学系 教授）

2. ポイント

- ✓ 2本の電子渦の運動を利用することで、簡易かつ精密に初期渦間距離の操作ができる新たな手法を開発した。
- ✓ 初期渦間距離が渦運動に与える効果を、電子プラズマを用いた実験において精緻に観測することを可能にした。

3. 概要

本学電気電子工学系 比村治彦 教授、大学院生 小川瑛仁（工芸科学研究科博士前期課程 電子システム工学専攻）らの研究グループは、Malmberg-Penning (MP) トラップ^{*1}内に閉じ込められた電子プラズマ^{*2}を用いて、理想流体中の渦運動を実験的に観測する研究を行っている。この実験において、2本の電子渦をそれぞれ独立に閉じ込めた後に合流させることで、その初期渦間距離を精密に制御する手法を考案し、従来の実験手法よりも簡易かつ自由に初期状態を設定することに成功した。これにより、初期渦間距離が渦運動に与える影響を精緻に検証することが可能となった。

この研究成果は、学術雑誌「Scientific Reports」の2024年10月号に掲載された。

4. 内容

研究の背景

鳴門の渦潮や竜巻、木星の大赤斑など自然界には様々な渦が存在する。このような渦は、速度場の回転（rot）である渦度が局所的に分布した領域として特徴づけられる。渦の基本的な相互作用のひとつとして、同じ向きに回る2つの渦が合体するという現象がある。この現象は合体前の渦の半径と渦どうしの中心間距離の比があるしきい値を超えたときに起こるとされている。しかし、合体现象のメカニズムは依然として完全には解明されていない。理想流体中の渦合体现象を実験的に検証する手法として電子プラズマが用いられる。これは、電子プラズマが一様磁場中に閉じ込められたときにその密度分布が二次元理想流体中

の渦度分布と等価になるという性質を持つためである。すなわち、電子プラズマの運動が渦領域の運動に直接対応する。我々の研究グループでは、BX-U 装置^{*3}を用いて電子プラズマを閉じ込め、理想流体における渦の合体現象の観測を行っている。理想流体中では渦半径が一定であるため、渦合体を観測するためには初期渦間距離の制御が必要となる。かつて行われた実験では、この渦間距離を精密かつ再現性よく制御することができていなかった。本研究では、2本の電子プラズマの中心間距離を自在に操作する新規手法を開発した。本論文では、その操作手法の詳細とその結果について示している。

研究内容

図1に我々が開発した手法の概略を示す。この手法では、まず長さの異なる2つのMPトラップにそれぞれ電子プラズマを閉じ込める。電子プラズマがトラップ軸から離れた位置に閉じ込められているとき、プラズマは軸回りに一定速度の回転運動を行う。この回転の角速度はプラズマの軸方向長さに依存するため、異なる長さのMPトラップに閉じ込められた電子プラズマは異なる角速度で回転する。このとき、2つのプラズマの中心間距離 d は角速度差 $\Delta\Omega = \Omega_1 - \Omega_2$ によって周期的に時間変化する。つまり、プラズマの閉じ込め時間 t を調整することで d の制御ができる。適当なタイミングで中央の電位障壁をなくすことで、そのタイミングに応じた d を初期値としてもつ2本の電子プラズマの系が生成される。

我々は、BX-U 装置においてこの手法を適用し、実際に電子プラズマの距離の制御に成功した。図2に示されるように、プラズマ間距離の変化は理論的な予測と一致している。本研究では、あらかじめ $10\ \mu\text{s}$ 毎に閉じ込め時間を変化させてプラズマの位置を撮影し、 d の離散的な時間発展を測定する。その後、測定値を理論式によってフィッティングし、 d の連続的な時間発展を記述する関数 $d(t)$ を得る。この $d(t)$ を用いて実際にプラズマ間距離の制御を行う。図3は閉じ込め時間を $1\ \mu\text{s}$ だけ変化させたときの初期状態とその後の時間発展である。この測定結果は、 d の変化が渦合体現象の進行に影響を与えることを観測できていることを示している。

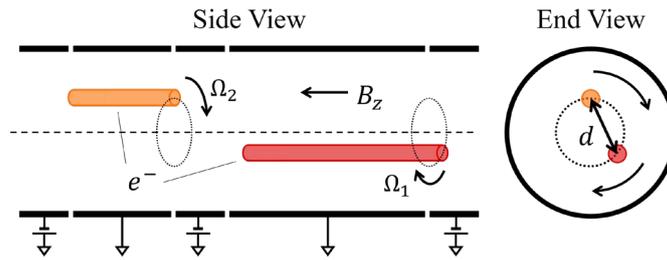


図1 電子プラズマ間距離制御手法の概略

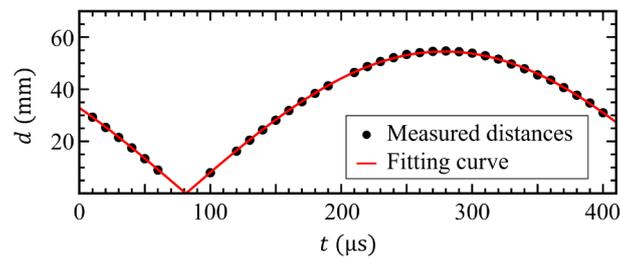


図2 電子プラズマ間距離 d の閉じ込め時間依存性

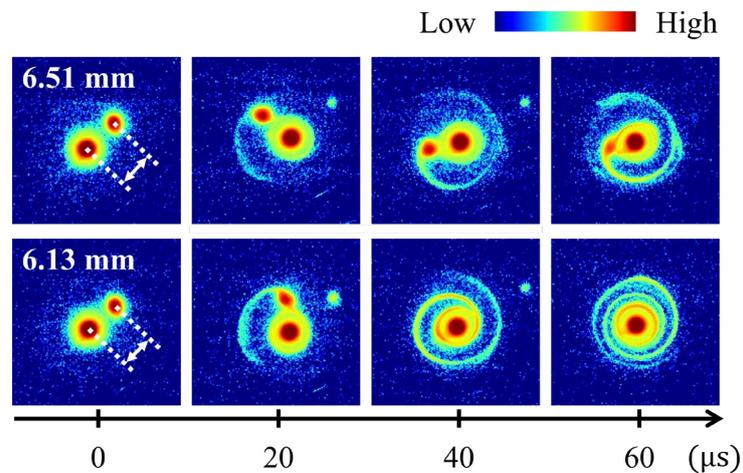


図3 2つの電子プラズマの初期状態とその後の系の時間発展

今後の展開

今後は、本研究で開発した手法を用いて実際に渦の合体現象についての検証を行う。この手法を用いることで、初期渦間距離が現象に与える効果を精密に評価することが可能となる。これにより、渦の合体現象において未解明な物理の発見につながる。現在、我々の研究室では、プラズマパラメータを変化させながら渦合体に関するデータを蓄積している。これらのデータをもとに、合体に要する時間や最終的な渦のサイズと渦間距離の相関について定量的な検証を進めていく。

5. 発表雑誌

雑誌名 : Scientific Reports

論文タイトル : Controlling the initial separation distance between two electron plasma vortices In a Malmberg-Penning trap

著者 : Akihito Ogawa, Yutaro Nakajima, Akio Sanpei, and Haruhiko Himura

掲載 URL : <https://www.nature.com/articles/s41598-024-76070-0>

6. 用語解説

※1 Malmberg-Penning トラップ

単一荷電粒子集団である非中性プラズマの代表的な閉じ込め手法の一つであり、円筒電極がつくる電位障壁と軸方向一様磁場によって構成される。荷電粒子は一様磁場によって径方向に閉じ込められ、端部の電位障壁によって軸方向に閉じ込められる。

※2 電子プラズマ

電子プラズマとは、電子のみによって構成されたプラズマを指す。このように単一の荷電粒子種のみによって構成されるプラズマを非中性プラズマという。中性のプラズマと同じように、デバイ長などのプラズマパラメータが定められており、プラズマとみなすための条件も課されている。

※3 BX-U 装置

本学電気電子工学系プラズマ基礎工学研究室(比村治彦教授)が所有する実験装置の一つであり直線型となっている。電子ビームソース、円筒型電極、そして、ソレノイドコイル磁場を用いて、電子プラズマの閉じ込め実験を行うことができる。

7. 謝辞

本研究は、JSPS KAKENHI Grant No.23KJ1403 及び 21H01056 の支援を受けて行った。