

中性粒子の流れと相互作用する渦

九州大学総合理工学研究院

田中雅慶

磁化プラズマ中の荷電粒子はラーマー回転しているが、それに外力 F が加わると、 $F \times B$ 方向に回転中心がドリフトしていく（ここで、 B は磁場ベクトル）。力 F の原因としては、プラズマの圧力 P (反磁性ドリフト)、内部電場 ($E \times B$ ドリフト)、磁力線のわん曲 (遠心力ドリフト) などがあるが、なかでも、 $E \times B$ ドリフトは渦形成の観点から最も重要なドリフトメカニズムである。このドリフトは、イオンと電子が同じ方向に同じ速度で流れ、電荷分離などの副次的な効果を起こさないという特徴がある。

いま、軸方向に磁場が加えられた円柱状のプラズマを考えると、径方向の両極性電場が存在するためにプラズマは円柱軸まわりに回転する流れを形成する。また、プラズマ中の静電波にともなうポテンシャル構造が存在する場合、プラズマは $-\nabla\phi \times e_z$ (ϕ は静電ポテンシャル、 e_z は磁場方向単位ベクトル) 方向にドリフトする。この時、 ϕ は流線関数になっていて、プラズマは ϕ の等高線に沿って流れている。したがって、磁場に垂直な面内で、閉じた等高線を持つ静電波の 2 次元構造があればそれは渦である。このように、磁化プラズマは渦の宝庫である。

図 1 に示すのが本講演で紹介する渦である。図中明るく見える部分はプラズマの密度が高くなっており、周囲のプラズマと比べて 2~3 倍の高密度になっている。それだけなら、特に取り上げることはないのだが、この渦の特異性はその回転方向にある。電場計測と流れ場の計測を行った結果、この渦は、 $E \times B$ ドリフト方向とは逆方向に回転しているのである (以下反 $E \times B$ 渦と呼ぶ)。なぜそのようなことが起こるのか、そこからどのような物理が引き出せるのか、この講演で紹介してみたい。

プラズマが回転しているということは、プラズマに何らかの力が働いていることを意味している。反 $E \times B$ 方向であるということは、電場と反対向きでかつ電場より強い力が存在していることを意味している。その力の発生機構は何なのだろうか。

詳しい実験を行った結果、反 $E \times B$ 渦は図 2 に示すように、共存する中性粒子密度分布に著しい窪み構造を常に伴っていることが明らかになった。背景中性粒子の急峻な密度勾配は半径方向内向きの流れを生じ、この流れとプラズマが運動量を交換すれば、プラズマに対して電場と反対向きの力を生じる可能性がある。運動量交換の素過程としては電荷交換衝突が最も頻度が高い。もし、この描像が正しければ、この渦は背景中性粒子の流れと相

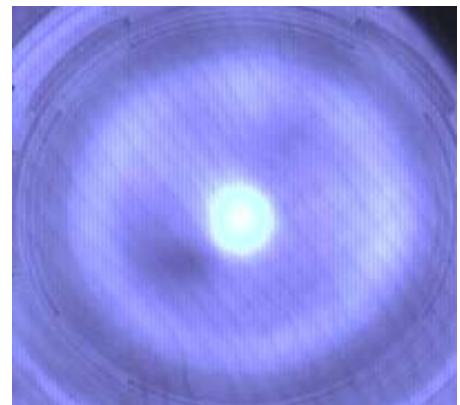


図 1 反 $E \times B$ 渦の CCD 画像

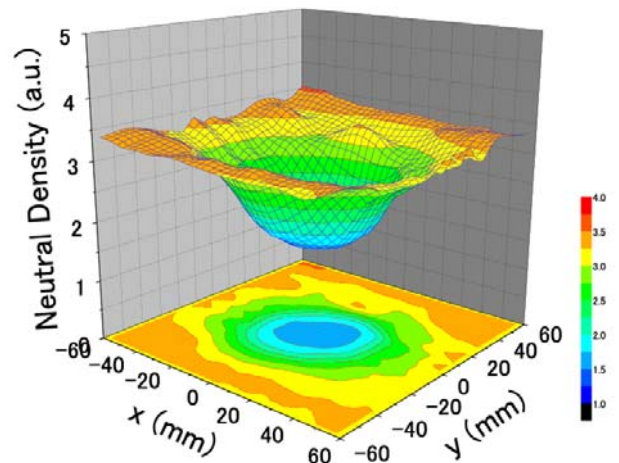


図 2 中性粒子密度分布。中心付近に深くぼみを伴う。

相互作用する新しいタイプの渦であるということになる。

では、これを実験で証明するには、どうしたらよいだろうか？当然のことながら、中性粒子の流れを直接測れば良いのだが、どのようにして中性粒子の流れを測るか。実は、その測定法が確立していないのである。中性粒子に対しては、プラズマのようにプローブ法は使えない。したがって、波長可変レーザーを用いた誘起蛍光法(LIF)によって流速を測定することになる。しかし、ここからが問題で、中性粒子はプラズマほど速く流れていないことを考慮すると、予想されるドップラーシフトは10MHzから100MHz(波長換算で0.016~0.16pm@700nm)である。レーザーの周波数が 10^{14} Hzであるとする、中性粒子の流れによるドップラーシフトを測定するには 10^{-6} ~ 10^{-7} の精度が要求されるのである。これだけの高精度なLIFドップラー分光システムを作れるかどうかは鍵となる。

幸いにも、狭帯域の波長可変半導体レーザーが比較的低価格で入手できるようになり、実験に用いるイオン種の励起波長に合った半導体レーザーがあればシステムを構成することができる。半導体レーザーのスペクトル幅は2MHz程度で、中性粒子の分布関数のドップラー広がり1GHzにくらべて十分に狭いので、LIF法によって分布関数を直接測ることができる。

図3は実験に用いたレーザーシステムの概念図を、また、図4はこのシステムを用いて測定されたLIFスペクトルを示している。半導体レーザー(波長696.735nm)の出力はEO変調器によって100KHzで振幅変調され、プラズマに入射されて準安定原子を励起する。上準位に上げられた原子が脱励起する際に放出される826.45nmの光を光電子増倍管(PMT)で受光する。PMTの出力はS/N比を上げるためロックイン検出を行う。またレーザーの波長基準としてはヨウ素の吸収線を用いている。図4はこのシステムで測定した2箇所のLIFスペクトルを示しているが、両者は約200MHzシフトしている。このシフトは流速換算で130m/sに相当し、向きは半径方向内向きである。したがって、予想したような中性粒子の速い流れは存在していることになる。

以上まとめると、プラズマ中には背景中性粒子の流れと相互作用する新しい渦が存在することを明らかにした。この結果は、中性粒子の流れがプラズマの構造形成に決定的な役割を果たしていることを示しており、プラズマのダイナミクスがプラズマだけで閉じていないことを意味している。

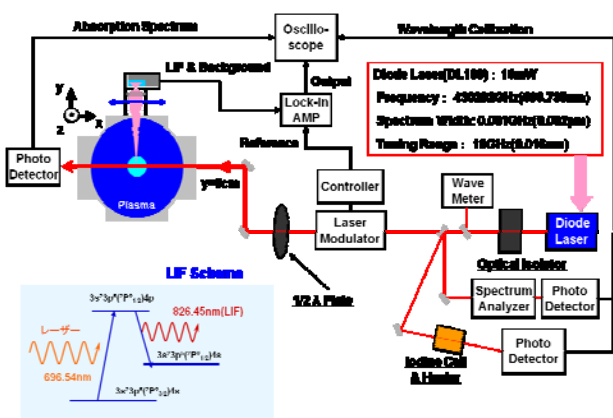


図3 レーザー誘起蛍光ドップラー分光システム

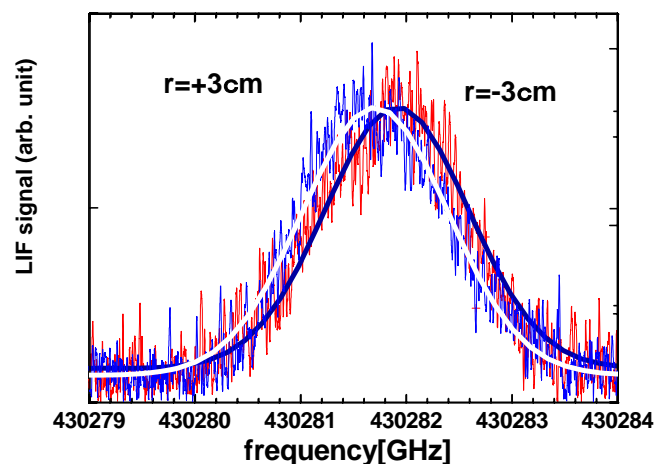


図4 誘起蛍光スペクトル。r=-3cm と r =+3cm では 200MHz のシフトがある。