

報告番号 ^{*} 甲第 2011 号

主論文の要旨

題名 直線型乱流加熱装置中の
ダブルレイヤーに関する研究

氏名 犬塚 博

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

犬塚

博

本論文は、プラズマの非線形現象である「ダブルレイヤー」およびそれに関連する現象を直線型乱流加熱装置中で観測した実験、計算機シミュレーション、および理論的検討の結果をまとめたものである。

ダブルレイヤーとはその名の通り、プラズマ中に正と負の二つの空間電荷層が近接して存在している状態で実験的には階段状の電位分布として観測される。宇宙プラズマの分野では、オーロラや太陽フレアの発生源である可能性から、近年盛んに研究が行われている。又、その他の宇宙空間における高速粒子の発生機構の候補として検討されている。核融合プラズマの分野でも、慣性核融合の実験装置中のプラズマやプラズマフォーカス装置中のプラズマでその発生が報告され、又、タンデムミラー装置中のサーマルバリアーの現象とも関連がある。

このようなダブルレイヤーが、当研究室に設置してある直線型乱流加熱装置中でも、発生していることが観測された。この装置は、単純ミラー磁場中に閉じ込められたプラズマに大電流を流し、乱流加熱機構により超高温プラズマを発生させ、その超高温プラズマを使って新しい計測法のテストを実施するために建設された装置である。この装置を使うことにより、乱流加熱装置中で発生するダブルレイヤーの特徴を調べると共に、従来余り研究が行われていない比較的高密度プラズマ中の強いダブルレイヤーの性質に関する研究が出来る。

まず、第1章では、ダブルレイヤー研究の歴史ならびに最近の研究結果を概括し、さらに本研究の意義および目的を明らかにした。

主論文の要旨

報告番号	※ 甲第	号	氏名	犬塚	博
<p>第2章では、直線型乱流加熱装置中で観測されるダブルレイヤーに関する実験結果をまとめた。まず、複数のプローブによるプラズマ中の電位の同時測定の結果から、加熱電圧印加直後から数μs~数百μsの間ダブルレイヤーが発生していることを明らかにした。このダブルレイヤーの電位差、厚さ、二次元的な拡がり等の基本的形状の測定の結果、電子温度の数千倍の電位差を持つ強いダブルレイヤーが形成されており、空間的には一次元的で、その厚さはダブルレイヤーの厚さに関する実験式であるJoyce氏とHubbard氏のスケーリング則にほぼ一致することが示された。更に、その発生から崩壊に至る間の空間的位置や移動及びその速度等に関する測定から、ダブルレイヤーは陰極前面において発生し、陽極方向にほぼイオン音速で移動し、両電極間の中央部で静止した後、最終的には陽極領域に達し崩壊することが示された。又、印加電圧が正であるにもかかわらず、電位が負となる領域がダブルレイヤーの陰極側で見つかった。更に、このダブルレイヤーが存在している間、強力に電流が制限され、電流はBohm電流以下に制限されることが示された。精密な放電回路の特性の評価から、この電流制限は放電回路に起因するものではなくプラズマの非線形性によることを明らかにした。プローブにより電位揺動も観測され、数MHz帯の低周波波動の発生が確認された。これらの結果は、Schamel氏のイオン音波ダブルレイヤーのモデルと良く一致した。</p> <p>第3章では、直線型乱流加熱装置中のダブルレイヤーを模擬する計</p>					

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	犬塚	博
------	-----	---	----	----	---

算機シミュレーションの結果について述べた。ダブルレイヤーは高度に非線形な現象であり、又、このように過渡的に変化する現象を理論からのみ議論するのは、現状では、その議論が定性的で定常な範囲に制限されるため、不十分である。そこで、この現象を理解する一助として計算機シミュレーションを行った。ダブルレイヤーの現象では、プラズマの分布関数の空間的・時間的变化が重要であるのでMHD的な取り扱いでは不十分で、運動論的取り扱いが必要となる。そこで、運動論的シミュレーションの一つである一次元のVlasovモデルを採用した。実効的な電位の形でミラー磁場の効果も取り入れた。その他の条件は出来る限り実際の実験条件と一致させるようにした。このシミュレーションを実行した結果、階段状の電圧印加後、ダブルレイヤーの発生が見られた。又、このダブルレイヤーが存在している間、電流はBohm電流以下にまで制限された。ミラー磁場の効果を取り入れたシミュレーションと取り入れていないシミュレーションを比較し、ミラー磁場が負電位領域の形成と電流制限に重大な影響を与えていることを明らかにした。波動の測定結果からダブルレイヤーの形成時にはイオン音波のみしか励起されていない事を示した。

更に、精度の高いプラズマ電位の測定により、ダブルレイヤーの形成より前に別の非線形現象である電子ホールと呼ばれる現象が発生していることが実験的に示された。この電子ホールに関する実験及びシミュレーション結果を第4章としてまとめた。電子ホールは、電子の

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	犬塚	博
------	-----	---	----	----	---

穴、すなわち電子が不足した領域がプラズマ中に存在する現象で、孤立した正電位パルスとして観測される。高速な電位測定の結果、直線型乱流加熱装置中では、電圧印加直後ダブルレイヤーの形成以前に $100 \sim 200 \text{ ns}$ 程度の寿命の電子ホールが発生していることが見つかった。これは、陰極から陽極に空間的に移動する印加電圧の2倍程度の正電位パルスとして観測される。この装置で観測された電子ホールは電子温度の1000倍程度の強い電子ホールであり、電子の熱速度の約6倍程の高速で移動するのが特徴的である。これらの結果は、電子ビームを考慮しない既存のいくつかの理論からは説明できなかったが、飯塚氏らにより提案された電子ビームを含んだ系での電子ホールの理論と一致した。この実験を模擬する計算機シミュレーションも実行し、実験結果と定性的に良く一致した結果が得られた。特にこのシミュレーションでは、電子ホールが通過した領域の捕捉電子に顕著な電子温度の上昇がみられた。これがイオン音波励起の原因となり、さらにダブルレイヤーの形成につながっているものと考えられる。

ルビーレーザトムソン散乱法による測定の結果、直線型乱流加熱装置中のプラズマのダブルレイヤーが存在している間と崩壊した後の電子温度の時間的・空間的な変化を初めて明らかにした。この結果を第5章としてまとめた。初期プラズマの電子温度は $10 \sim 20 \text{ eV}$ であるが、加熱電圧印加直後 $30 \sim 40 \text{ eV}$ に急上昇する。これは、第4章で述べた電子ホールによる電子加熱と見られる。その後、ダブルレ

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	犬塚	博
------	-----	---	----	----	---

イヤーが維持されている間は、ほぼ、この温度が維持される。その後、プラズマ中の波動の振幅が大きくなると、電子温度は再び上昇を始め、ダブルレイヤーの崩壊後、急上昇すること等が示された。その後は、不純物放射の量が増しレーザ散乱による電子温度測定は不可能になるが、そのいくつかの不純物線の放射強度から電子温度を見積ると、最大で数keVにまで達していると見られる結果が得られた。この結果は、以前行われたX線放射による電子温度の評価とほぼ一致した。

第6章は、ダブルレイヤーの崩壊過程に関する実験結果について述べた。乱流加熱装置で観測されたダブルレイヤーに特徴的な性質として、数 μ s～数百 μ sの寿命で自然に崩壊することがあり、その崩壊が起こる原因を調べている。ダブルレイヤーの寿命を決めるパラメータを調べ、初期プラズマの電子密度、ダブルレイヤーを流れる電流、中性ガス圧等が影響している結果が得られた。特に、電流に対する依存性は最もばらつきが小さく、加熱電圧によらず、一定量の電荷がダブルレイヤーを通過した時、崩壊が引き起こされることを実験的に明らかにした。崩壊過程を電離等の原子過程とプラズマ・壁相互作用の観点から考察した。

最後に、第7章では、本研究で得られた結果をまとめ、今後の課題や問題点を述べた。