

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	Feng Wu
論文題目	Study of laser propagation and soliton formation in strongly magnetized plasmas (強磁化プラズマ中でのレーザー伝播とソリトン形成に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、高速点火方式のレーザー核融合、レーザー駆動の高エネルギー粒子加速やテラヘルツからX線・ガンマ線に至る高輝度放射源など、相対論領域の高強度レーザーとプラズマとの相互作用研究において、近年、生成が可能になってきているキロテスラ (kT) オーダの高強度磁場の印加がもたらす物理過程とその理論解析の結果をまとめたもので、以下の7章から構成される。</p> <p>第1章は序論であり、極短パルス高強度レーザーとプラズマとの相互作用研究の現状とソリトン形成を含む線形および非線形理論の背景と基礎を説明するとともに、高強度レーザーとプラズマとの相互作用におけるキロテスラ (kT) オーダの高強度磁場の印加の役割について論じている。特に、ソリトン形成に関して、外部磁場を考慮しない、これまでの研究の概要について論じるとともに、本研究の動機・目的と意義を提起している。</p> <p>第2章では、レーザー伝播方向と印加磁場の方向が同じ場合において、相対論領域の直線および円偏光の高強度レーザー場中での単一電子運動の解析解と求めるとともに分散式を導出し、磁化プラズマ中でのレーザーの伝播・吸収特性を議論している。特に、レーザー強度の増大とともに相対論効果によってホイスラー波が短波長領域で変形を受け、対応する分散が消失することを見出すとともに、粒子シミュレーションによってその過程を検証している。</p> <p>第3章では、レーザー伝播と同方向にキロテスラ (kT) オーダの磁場を印加した場合の亜臨界磁化プラズマと高強度レーザーとの相互作用に関する粒子シミュレーションを行い、ファラデー回転、左・右周り円偏波、ホイスラー波などの磁場印加に伴う波動構造の変化に着目し、レーザー場の線形および非線形伝播・吸収特性やプラズマ加熱特性の詳細を調べた。その結果、これらの特性は磁場印加に伴って大きく変化することが分かった。</p> <p>具体的には、① 最大吸収率を与える最適な磁場強度が存在すること、② 10kTを上回る強磁場領域では、伝播モードである右回り円偏波成分が、相対論的電子サイクロトロン波共鳴加熱 (ECR) によって、比較的弱いレーザー強度でも80%を上回る高い吸収率を示すこと、③ さらに高磁場になるとレーザーが短波長のホイスラー波に変換され、伝播・吸収されることなどが分かった。レーザーは磁場がなければ遮断される高密度プラズマでもホイスラー波として伝播できることから、これらの結果はこれまでの相互作用の描像を変えるものである。</p> <p>上記①に関連して、最大吸収率を与える磁場強度付近での相互作用を調べたとこ</p>			

る、プラズマ中に波長オーダーで長時間存在する孤立波(以下「ソリトン」)が励起され、それが吸収率の増大に寄与していることが分かった。このソリトンは密度キャビティを形成し、その中で右回り円偏波として存在していること、周波数がレーザー場より低周波側に変位していること、プラズマ中で停留したり移動したりするなど、特異な運動を示すことなどを明らかにした。

第4章では、3章におけるシミュレーションで見出したソリトンに関わる相互作用を理論的に記述するため、イオン運動効果および有限温度効果を取り入れた磁化プラズマ中のソリトンを記述する理論モデルを導出・提案している。また、導出した理論モデルは、レーザー場の境界条件を適切に選択することによって、1) 電磁場のエネルギー密度が空間的に局在する「明るい (Bright) ソリトン」と2) 空間に一様な電磁場のエネルギー密度がある中で、エネルギー密度が減衰した領域が局在する「暗い(dark)ソリトン」を導くとともに、シミュレーションで見出したソリトンは明るいソリトンに相当することを示した。

第4章の理論モデルに対応して、第5章では明るいソリトンについて、第6章では暗いソリトンについて、生成されるソリトンの周波数と波数の印加磁場の強度に対する依存性を調べるとともに、それらに対するプラズマの有限温度やイオン運動の役割を明らかにした。また、磁場強度の増大とともに、明るいソリトンの振幅は増大する一方、周波数は減少することが分かった。これらはシミュレーション結果を定性的に説明するものである。

第7章では、本研究で得られた高強度レーザーと磁化プラズマとの相互作用に関する主要な成果とその意義についてまとめるとともに、応用研究を含む今後の研究の展開の方向と課題について議論をしている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高速点火方式のレーザー核融合、レーザー駆動の高エネルギー粒子加速、テラヘルツからX線・ガンマ線に至る高輝度放射源など、相対論領域の高強度レーザーとプラズマとの相互作用研究において、近年、生成が可能になってきているキロテスラ (kT) オーダの高強度磁場の印加がもたらす物理過程とその理論・シミュレーションによる解析結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

- 1) キロテスラ (kT) オーダの高強度磁場を印加した場合の高強度レーザーと亜臨界磁化プラズマとの相互作用に関する粒子シミュレーションを行い、左・右周り円偏波やホイスラー波など、磁場印加に伴う波動構造の変化に着目し、レーザー場の線形および非線形伝播・吸収特性やプラズマ加熱特性の詳細を調べた。その結果、① 最大吸収率を与える最適な磁場強度が存在すること、② 10kT を上回る強磁場領域では、右回り円偏波成分が相対論的電子サイクロトロン波共鳴加熱 (ECR) によって比較的弱いレーザー強度でも 80%を上回る高い吸収率を示すこと、③ さらに高磁場になるとレーザーが短波長のホイスラー波に変換され、伝播・吸収されることなどが分かった。レーザーは磁場がなければ遮断される高密度プラズマでもホイスラー波として伝播できることから、高強度磁場の印加は、これまでのレーザーとプラズマとの相互作用の描像を変えるものである。
- 2) 大きな吸収率を与える磁場強度付近 (上記①) での相互作用を調べたところ、プラズマ中に波長オーダで長時間存在する孤立波 (以下「ソリトン」) が励起され、それが吸収率の増大に寄与していることが分かった。このソリトンは密度キャビティを形成し、その中で右回り円偏波として存在すること、周波数がレーザー場より低周波側に変位していること、プラズマ中で停留したり移動したりするなど、特異な挙動を示すことが分かった。
- 3) ソリトンに関わる相互作用を理論的に記述するため、イオン運動および有限温度の効果を取り入れた磁化プラズマ中でのソリトンを記述する理論モデルを構築し、ソリトン形成における外部磁場の役割を明らかにするとともに、磁場強度の増大に対して局在性の高いソリトンが形成されるシミュレーションを再現する結果を得た。

以上の研究は、磁場印加の重要性が注目されているレーザーとプラズマ相互作用研究において、相互作用の基本的なメカニズムについての理論的指針を与えるものである。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年8月19日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降