



Title	Theoretical Study of Particle Acceleration in Multi-scale Laser-Plasma Interactions
Author(s)	高木, 悠司
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101907
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (高木 悠司)

論文題名

Theoretical Study of Particle Acceleration in Multi-scale Laser-Plasma Interactions

(多階層レーザープラズマ相互作用による粒子加速に関する理論的研究)

論文内容の要旨

高強度レーザーとプラズマとの相互作用 (Laser-plasma interaction: LPI) によるプラズマ粒子加速に関する研究を行った。研究は二部からなり、一部ではレーザー強度が 10^{18} W/cm² を超える相対論的強度領域での Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) による水素イオンの最大加速エネルギー予測に関する研究、二部ではレーザー強度が 10^{15-16} W/cm² の近相対論的強度領域での誘導ラマン散乱 (Stimulated Raman scattering: SRS) による電子加速過程に関する研究を行った。

相対論的強度レーザーを用いたイオン加速は短い加速長でイオンを高価数かつ高エネルギーまで加速できる。特に TNSA 方式は粒子線がん治療装置等への応用が期待されており、現在 TNSA 実験における大きな目標の一つが水素イオンの 100 MeV 以上への加速である。これまで理論モデルやシミュレーションによる予測からレーザー強度の増強によりこの目標は達成可能である考えられてきた。しかし、ピーク強度が 10^{20} W/cm² を超える超高強度領域で加速エネルギー上昇の鈍化が顕在化し、予測と実験結果との乖離が問題となり始めた。本研究ではこの問題を克服するべくベイズ推定に基づく重回帰分析手法を用いて水素イオンの最大加速エネルギー予測モデルを構築した。モデルは良い予測精度を示し、特に超高強度領域での LPI の時間及びレーザー強度の多階層的な効果を組み込んだモデルは、加速エネルギー鈍化を攻略するための指針を与える結果を示した。

近相対論強度領域では SRS がレーザーからプラズマへのエネルギー変換過程で大きな役割を果たす。SRS は大振幅の電子プラズマ波 (Large-amplitude Langmuir wave: LALW) を励起し、その波に乗った電子は周囲の熱電子より 1 桁以上高いエネルギーまで加速される。発生した非熱的高速電子は高密度プラズマ中にレーザーのエネルギーを輸送しレーザー駆動衝撃波の形成及び伝播に影響する為、特に衝撃点火等のレーザー核融合方式において燃料圧縮性能を決める要因の一つとしてその特性の理解が重要となっている。本研究では Particle-in-cell シミュレーションを用いて密度勾配を持つプラズマ中での SRS の成長及び高速電子発生過程を百ピコ秒に渡って観測した。結果、数十ピコ秒の LPI を経て、従来の一様密度プラズマ中での LW 励起による電子加速とは違う統計的加速過程による高速電子発生が実現することを発見した。長時間 LPI による高温非一様密度プラズマ中では SRS による LALW は成長せず、波によるフェムト秒スケールでの加速に替わり、SRS 起因の密度揺動が作る揺動電場中でのピコ秒スケールでの統計的電子加速が高速電子発生過程を支配することを解明した。この結果は今後レーザー核融合における実験デザイン及び燃料圧縮性能の向上に重要な知見を与える。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (高 木 悠 司)			
論文審査 担当者	(職)		氏 名
	主 査	教授	千徳 靖彦
	副 査	教授	越野 幹人
	副 査	教授	藤岡 慎介
	副 査	教授	岩田 夏弥
	副 査	准教授	坂和 洋一

論文審査の結果の要旨

レーザー光は、指向性、単色性、時空間コヒーレンスに優れた電磁波である。レーザー技術の発展により、光のエネルギーをナノ秒からフェムト秒 (10^{-15} 秒) に圧縮し、微小空間に集光することで、相対論的強度 (10^{18} W/cm² 以上と定義) を持つ高強度レーザー光の発生が可能となった。高強度レーザーを物質に照射すると、物質は瞬時に電離しプラズマ状態となり、レーザーとプラズマの相互作用を通して高温高密度プラズマが形成されていく。プラズマ加熱過程ではレーザー波長の 100 倍を超える広い空間に 2-3 桁の密度変化のあるプラズマが発展し、レーザー光はプラズマ中を伝播する過程で、電子を相対論的エネルギーまで加速する。高温高密度プラズマ形成を考えるためには、電子の加速機構、イオン運動に伴うプラズマ発展といった多階層の物理を包括的に理解する必要がある。

本論文は 6 章で構成されており、全体は 3 つに分けられる。第 1 部 (1 章) は研究背景とし、高強度レーザープラズマ相互作用の基礎物理と多階層現象の重要性について説明している。

第 2 部 (2、3、4 章) は、医療等への応用が期待される相対論的高強度レーザーと固体薄膜ターゲットを用いたイオン加速について、薄膜裏面からシース電場で加速される水素イオンのエネルギーの予測モデルの構築に取り組んだ。従来のモデルは、レーザー強度が 10^{20} W/cm² を超える超高強度領域における実験結果との乖離が問題となっていた。本研究では、ベイズ推定に基づく重回帰分析手法を導入し、また、レーザー強度の多階層的効果や電子振動長など、レーザープラズマ相互作用の物理から推察される新たなパラメーターを組み込むことで、高精度な予測モデルを提唱した。新予測モデルは、高強度レーザーによる水素イオン加速実験の指針を与えるものである。

第 3 部 (5、6 章) は、レーザー強度が 10^{16} W/cm² 程度の近相対論的領域における非熱的電子の発生機構を解明した。近相対論的レーザープラズマ相互作用は、レーザー核融合での衝撃波形成において重要であり、ピコ秒の時間スケールでパラメトリック不安定性による電子プラズマ波が非熱的電子を生成することが知られている。本研究では、衝撃波形成時に現れる不均一密度プラズマと近相対論的レーザー光の相互作用を、レーザー光の振動時間であるフェムト秒からパラメトリック不安定性の時間スケールを超えるサブナノ秒まで包括的に解析した。1 次元プラズマ粒子シミュレーションによる解析の結果、従来の予測通りピコ秒スケールでパラメトリック不安定性を介した電子加速が観測された。しかし、徐々に高温化するプラズマ中では、パラメトリック不安定性が飽和し、その後、非一様な密度の擾乱が作る揺動電場により、電子は統計的加速を受けることが明らかになった。その結果、レーザー電場の振動エネルギーより 2 桁以上高いエネルギーまで電子は加速されることを解明した。本成果は、今後のレーザー核融合実験における衝撃波形成において重要な知見を与えるものである。

以上、本研究は、広いパラメーター領域を持つ高強度レーザープラズマ相互作用を、多階層現象として包括的に捉えることで、レーザー粒子加速に関して新たな物理描像を与えた。本成果は、レーザーイオン加速やレーザー核融合の発展に貢献するものである。よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。