

論文題目要旨

学位申請者：高木悠司（物理学専攻）

論文題目：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/cm^2 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 $10^{15-16} \text{ W/cm}^2$ 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 100MeV 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/cm^2 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 1 次元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。