

学位申請者：

杉本馨 理学研究科物理学専攻およびレーザー科学研究所 D3

論文題目：

Theoretical and numerical study of non-equilibrium plasma driven by intense laser light (高強度レーザーが駆動する非平衡輻射プラズマの理論・シミュレーション研究)

主査：千徳靖彦

副査：中井光男、藤岡慎介、浅野建一、岩田夏弥

論文要旨：

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。近年のレーザー技術の発展により、パルス幅がフェムト秒 (fs、 10^{-15} 秒) 程度で、ペタワット (PW、 10^{15} W) を超える強度のレーザー光を発生させることができるようになった。このような高強度レーザーを物質に照射すると、原子から瞬時に電離した電子がレーザー電磁場に晒され、相対論的なエネルギーにまで加速される。物質中の高エネルギー電子は、原子やイオンと衝突し、さらに電離・加熱されて高温高密度プラズマ、すなわち非平衡輻射プラズマが形成される。この非平衡プラズマ中の高エネルギー電子から、硬 X 線からガンマ線までの高エネルギー光子が輻射される。高強度フェムト秒レーザーパルス固体ターゲットに照射すると、生成されたプラズマは高輝度短パルスな輻射源となる。これらの放射光は、高エネルギー密度プラズマのバックライト計測、光核反応、放射線がん治療などへの応用が期待されている。また、この輻射プラズマは高エネルギー光子に関連した QED 過程の検証のためのプラットフォームとなり得る。

本研究の目的は、高強度レーザーによって駆動される非平衡状態の輻射プラズマの形成過程を包括的に理解することである。この時、プラズマの集団的なダイナミクスと微視的な原子過程と輻射過程が複合的に生じるため、解析的なアプローチでは総合的な理解は難しい。学位申請者は、粒子シミュレーション(PIC)のベースに原子・輻射過程を実装することで、非平衡輻射プラズマの集団的ダイナミクスを包括的に解析することを可能とした。

本論文は2つの主要なトピックから構成される。一つ目は、超相対論的領域における電子・陽電子ペアを生成する輻射プラズマの自己組織化である。極短パルスレーザーはガス状プラズマ中に磁場チャンネルを形成し、チャンネル内部でレーザー加速された高速電子が指向性の高いガンマ線をシンクロトロン輻射し、パルスフロントでの光子衝突構造が自己生成されることを明らかにした。さらに線形 Breit-Wheeler (BW) 過程により、大量の電子・陽電子対が生成され加速されることを示した。この相対論的輻射プラズマは、線形 BW 過程を実験的に初めて検証できるプラットフォームであると同時に、新たな高エネルギー陽電子源への応用が期待される。

二つ目は、高強度レーザー照射による高価数プラズマの形成過程の解明である。レーザーと高価数プラズマの相互作用は、衝突電離や制動放射、輻射再結合、輻射脱励起などの原子・輻射過程を含むため、プラズマの形成過程は非常に複雑である。このため、その形成過程の包括的な理解は得られていなかった。学位申請者は、輻射輸送計算と連動したPICシミュレーションを用いて、レーザー駆動高価数プラズマ形成を自己無撞着に計算することに成功した。レーザー駆動の高温銀プラズマからの輻射パワーや、keV以上に加熱された銀プラズマの維持時間は数ピコ秒程度であることを示した。今回開発したモデルは、レーザーから輻射へのエネルギー変換効率を最大化する上で重要な役割を果たす。

本研究は、非平衡プラズマのダイナミクスを、輻射過程を含めて自己無撞着に研究するための数値的プラットフォームを初めて構築し、QED現象までを含む輻射プラズマ形成の新しい知見を提供するものである。