



Title	Theoretical and numerical study of non-equilibrium radiative plasma driven by intense laser light
Author(s)	杉本, 馨
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92158
rights	© IOP Publishing. Reproduced with permission. All rights reserved
Note	

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 (杉 本 馨)

論文題名

Theoretical and numerical study of non-equilibrium radiative 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)

論文内容の要旨

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。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で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ネルを形成し、チャ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。線形BW過程はこれまでに実験的に検証されていない現象である。したがって、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。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (杉 本 馨)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 千徳 靖彦
	副 査	教授 中井 光男
	副 査	教授 藤岡 慎介
	副 査	教授 浅野 建一
	副 査	准教授 岩田 夏弥

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。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。高エネルギー電子は、原子やイオンと衝突し物質を電離・加熱するとともに、X 線やガンマ線を輻射することで非平衡輻射プラズマを形成する。この非平衡輻射プラズマの物性を明らかにすることは、高エネルギー密度科学の高強度場での学術的展開や、高輝度短パルスな輻射源への応用研究への発展が期待される。

本論文は 5 章で構成されており、第 1 章は研究の背景として、高強度レーザー技術の発展、高強度レーザー光とプラズマの相互作用の基礎物理、さらに輻射過程について説明している。

第 2 章は非平衡プラズマのダイナミクスを計算するために使用したプラズマ粒子シミュレーションコードの概要、特に申請者が新たに組み込んだ陽電子・電子対生成の物理モデルの詳細を説明している。

第 3 章は、2 次元プラズマ粒子シミュレーションによって、超高強度レーザー光とプラズマの相互作用を計算し、レーザー光の相対論的自己集束と光子圧によって形成されるチャネル構造の形成過程を説明するとともに、磁場チャネル構造の中でのシンクロトロン放射とパルス先端で励起される静電場による対向 X 線の輻射機構を明らかにした。その結果、プラズマ中において光子の対向衝突構造が自己生成され、線形ブライト・ウィーラー過程により、電子・陽電子対生成が起こること、さらに静電場により陽電子は加速され GeV 級のエネルギーを持つ指向性の高い陽電子ビームを形成することを明らかにした。相互作用中に起こる他の陽電子・電子対生成機構との比較やプラズマ密度スケールリング則を含め実験的に検証するための条件を提示している。

第 4 章は、高強度レーザー照射による高価数プラズマの形成過程を説明している。衝突電離、制動放射、輻射再結合、輻射脱励起などの原子・輻射過程を含むシミュレーションを行い、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。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が数ピコ秒程度であることを明らかにした。本成果は、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。

以上、本研究は、高強度レーザー光が作り出す非平衡輻射プラズマのダイナミクスを、輻射輸送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、「輻射プラズマの自己組織化による物質生成」という新たな物理描像を与え、その特性を初めて明らかにした。本成果は「高強度レーザー光が物質を加熱する過程の中で、どのように X 線・ガンマ線が輻射されるか」について、関心のある理学・工学の別を問わない広範な分野の発展に資する成果である。以上により、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。