

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	川人 大希
論文題目	Study of ionization dynamics of high-Z target irradiated by high-intensity laser and acceleration of multiply charged ions (高強度レーザーに照射された高Zターゲットの電離ダイナミックスと多価イオンの加速に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、近年急速に発展している集光強度が 10^{21-22} W/cm² 領域に達するフェムト秒オーダーの極短パルス高強度レーザーと炭素やアルミ、金などの重元素からなる物質との相互作用の素過程の解明とそれによる高エネルギー多価イオンの生成と加速の物理機構を明らかにすることを目的に、そのプロセスにおいて重要な役割を果たす原子・緩和過程および輻射過程を取り入れた粒子コードの開発を行うとともに、そのコードを用いて、高強度レーザーに照射された固体状態の炭素、アルミニウム、および金の電離過程とそれによって生成される多価プラズマの生成過程、高エネルギー多価イオン加速過程に関するシミュレーション研究とそれに基づく理論研究を行った結果をまとめたものであり、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、近年の短パルス高強度レーザー開発の現状とそれによる様々な学術・応用研究の現状を紹介するとともに、そのような高強度レーザーを物質に照射したときのレーザーエネルギーの吸収・伝播過程や電子およびイオンの加速過程を中心に、高強度レーザー生成プラズマの相対論的な動力学を記述する基本的な理論モデルの概要が述べられている。また、それに基づいて、高強度レーザーを重元素物質に照射した場合の電離過程とプラズマ生成過程、それに伴うレーザーの伝播、エネルギーの吸収過程、粒子加速過程、輻射輸送過程などの重要性和意義について議論している。</p> <p>第2章では、高強度レーザーを照射されたプラズマの動力学を記述する相対論領域の電磁的粒子シミュレーションの原理と数値手法を概説するとともに、本研究の中心課題である高強度レーザーを照射された物質がプラズマ化するプロセスを再現するための原子過程、衝突・緩和過程および輻射輸送過程を自己無撞着に取り入れた粒子シミュレーションの方法論とそれに基づくコード開発について記述している。これにより、本論文で対象とする炭素と金のトンネルイオン化および電子衝突による電離過程、内殻電子衝突およびオーグメント過程による電離過程、それらに伴うレーザーエネルギー損失過程、高強度レーザーに照射された電子の輻射減衰過程など、多価イオンからなる重元素プラズマの相対論領域での動力学を記述する統合的な粒子モデルとそれに基づくシミュレーションコードの開発に関して論じている。</p> <p>第3章では、第2章で述べたコードを用いて、10^{19-20} W/cm² 領域の直線偏光の高強度レーザーに照射された固体炭素薄膜内部のレーザー伝播方向の電離過程に関するシミュレーション結果の詳細を報告している。特に、シミュレーションにおいて、レーザーによって固体表面で加速された高エネルギー電子群の伝播とそれに伴って生成される電場が固体内部に多段的な電離をもたらし、それにより固体炭素薄膜が完全電離に近いプラズマ状態に移行することを見出して</p>			

いる。具体的には、4 価までは場電離による短いスケール長の電離波の形成とその光速オーダーの伝播、5 価・6 価は電子衝突による長いスケール長の電離波の形成とその高速伝播によって支配されることを見出した。また、高エネルギー電子によって駆動されるプラズマ波(航跡場)による場電離も電離過程に影響を与えることを示している。また、そのような電離過程のレーザー強度依存性、レーザーの偏光の違い(円偏光)による電離過程の相違、そのような電離過程を記述する理論モデルについても議論している。

第3章が、高強度レーザーを固体薄膜の照射した場合のレーザー伝播方向(縦方向)の電離過程に着目した空間1次元のシミュレーションであるのに対して、第4章では、アルミニウムの固体薄膜に同様の高強度レーザーを有限のスポット幅で照射した場合の横方向の電離過程を含む2次元シミュレーション結果を報告している。アルミニウムに対しても縦方向の多段的な電離過程を観測するとともに、発生した高エネルギー電子が固体薄膜の両面に形成されるシース電場に閉じ込められ、それが固体薄膜中を横方向に伝播して、その方向にも電離波が縦方向より遅い時定数で形成されることを議論している。

第5章では、同様のレーザーと金の固体薄膜との相互作用シミュレーションを行い、その電離過程と生成される高価数の多価イオンの加速機構の解析結果を報告している。特に、固体表面の電子に作用する高強度レーザーの放射圧とそれに伴う電場によって電離・加速される高価数の多価イオンと固体表面で生成された高エネルギー電子が固体裏面に生成するシース電場によって高価数に電離・加速される多価イオンが生成されることを見出すとともに、その両者の機構で生成される多価イオンの価数分布特性と最大加速エネルギーの理論モデルを導いている。また、最大価数の多価イオン($Z\sim 71$)は固体表面で生成される一方、最大エネルギーの多価イオン($Z\sim 69$)は固体裏面で生成されること、また、これらは裏面に付着した水素や水などの影響を強く受けることを見出している。

第6章では、本シミュレーション研究で行った高強度レーザーを炭素、アルミニウム、および金の固体薄膜に照射した場合の電離過程と多価イオンプラズマの生成過程、多価イオンの加速過程について解析した主な成果を要約するとともに、重イオンプラズマを中心とした高エネルギー密度プラズマ研究の重要性と今後の課題について述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、近年急速に発展している集光強度が 10^{21-22} W/cm² 領域に達するフェムト秒オーダーの極短パルス高強度レーザーと炭素やアルミニウム、金などの重元素からなる物質との相互作用の解明とそれによる高エネルギー粒子加速を目的としたものであり、原子・緩和過程および輻射過程を取り入れた粒子コード開発とシミュレーション研究により以下の結論を得た。

1) プラズマの粒子手法を基礎に開発された原子・緩和過程を取り入れた電磁粒子コード (EPIC) に、電離過程に伴う電磁場の減衰効果、高エネルギー電子と高価数原子の衝突による制動輻射過程、内殻電離に伴う励起輻射過程、高強度レーザー場中の電子の加速度運動による輻射減衰過程を導入することにより、超高強度レーザーに照射された重元素物質の電離過程および高価数の多価電離イオンの生成・加速過程を解析するシミュレーション手法を開拓した。

2) 10^{19-20} W/cm² 領域の高強度レーザーと炭素の固体薄膜との空間 1 次元および 2 次元の相互作用シミュレーションを行い、固体内部の電離過程の解析を行った。その結果、レーザーによって固体表面で加速された高エネルギー電子群の伝播とそれに伴って生成される電場が固体内部に多段的な電離波を形成し、それにより固体が完全電離に近いプラズマ状態に移行することを見出した。具体的には、4 価までは場電離による短いスケール長の電離波の形成とその光速オーダーの伝播、5 価・6 価は電子衝突による長いスケール長の電離波の形成とその高速伝播によって支配されることを見出した。また、高エネルギー電子によって駆動されるプラズマ波 (航跡場) による場電離も電離過程に影響を与えることを示した。

3) 同様のレーザーと金の固体薄膜との相互作用シミュレーションを行い、その電離過程と生成される高価数の多価イオンの加速機構の解析を行った。その結果、固体表面の電子に作用する高強度レーザーの放射圧とそれに伴う電場によって電離・加速される高価数の多価イオンと固体表面で生成された高エネルギー電子が固体裏面に生成するシーブ電場によって高価数に電離・加速される多価イオンの両者が生成されることを見出すとともに、それら両者の機構で生成される多価イオンの価数分布特性と最大加速エネルギーの理論モデルを導いた。特に、最大価数の多価イオン ($Z \sim 71$) は固体表面で生成される一方、最大エネルギーの多価イオン ($Z \sim 69$) は固体裏面で生成されること、また、これらは裏面に付着した水素や水などの影響を強く受けることを見出した。

以上の研究は、超高強度レーザーと物質との相互作用研究が世界的に進展する中、それを重元素物質に発展させた理論・シミュレーション研究として、重元素プラズマに関わる高エネルギー密度プラズマの学術・応用研究に対して理論的な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 30 年 2 月 21 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： 2019 年 3 月 25 日以降