

氏名	まさ き とも ひろ 正 木 知 宏
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第176号
学位授与の日付	平成20年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻
学位論文題目	高強度レーザーと物質との相互作用に関するシミュレーション研究

論文調査委員 (主査) 教授 岸本泰明 教授 近藤克己 教授 宮崎健創

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、フェムト秒オーダーの高強度極短パルスレーザーと物質との相互作用を解明するために行った、原子過程や緩和過程を取り入れた粒子モデルに基づくシミュレーションコードの開発と、これを用いた高強度レーザーと少数多体系として注目されているクラスターや固体薄膜との相互作用シミュレーション、およびその理論解析に関する研究結果をまとめたもので、5章からなっている。

第1章は序論で、近年著しい発展を見せているフェムト秒オーダーの高強度極短パルスレーザーと物質との相互作用、およびそれを利用した様々な応用研究について概説している。これに基づいて、本論文における研究課題である高強度極短パルスレーザーとクラスターや薄膜の相互作用研究の動機付けと意義を論じている。

第2章では、最初に、広くレーザーとプラズマとの相互作用研究の解析に用いられる相対論的な電磁粒子シミュレーションの原理と数値手法を概説している。これに基づいて、様々な波長領域の電磁場による原子のトンネルイオン化や電子衝突による電離過程、および、エネルギーや運動量を厳密に保存する電子・中性粒子間や荷電粒子間の衝突・緩和過程を取り入れた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。これにより、物質を構成する原子やデバイ球内部の媒質のミクロな状態変化と、その下での線形・非線形分極場や二次的波動励起、それに伴う粒子加速など、媒質のマクロな集団的相互作用を自己無撞着に解析する新しい方法論を提案している。

第3章では、開発した粒子コードを用いて、半径20ナノメートル程度のアルゴンクラスターとパルス長が約20フェムト秒、パワーが $10^{17}$ - $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>程度の高強度極短パルスレーザーとの相互作用シミュレーションを行い、アルゴンクラスターの電離過程とそれに伴うクラスター膨張のダイナミクスを調べた。その結果、クラスター表面に入射レーザー強度を一桁以上上回る高強度の振動電場が生成され、これによるトンネルイオン化過程によって真空中のレーザー場強度では生成されない高価数(13-16価)のイオンが生成されることが分かった。詳細な解析の結果、この高強度電場はクラスター表面近傍に生成されるレーザー駆動の分極場とクラスター膨張を引き起こす両極性電場の相乗効果によるものであることが分かった。また、電子衝突によるイオン化により、同様の高価数イオンがクラスター中心部にも生成され、この結果、高価数イオンはクラスター表面と内部に分布する二重構造を示すことが分かった。また、対応する電子の速度分布関数はマックスウェル分布から大きく離れた非平衡状態となり、それに伴う内部シース電場の形成など、表面自由度を有するクラスター特有の顕著なダイナミクスを明らかにしている。

さらに、輻射遷移や自動電離過程を取り入れたレート方程式と粒子シミュレーションを自己無撞着に結合させることにより、非平衡な電子速度分布関数のもとでの電子衝突による内殻(K殻)電離に起因するフッ素・酸素・窒素・炭素・ボロン・ベリリウム様の放射X線の評価を行った。その結果、クラスターから放射されるX線のスペクトル特性はクラスターの膨張ダイナミクスの影響を強く受け、特にレーザー強度を増大させるとクラスター膨張が促進されることから、100フェムト秒以下の極短パルスX線が得られることを見出した。これらの研究は、高強度レーザーとクラスターの相互作用を利用す

ることにより、フェムト秒オーダの高強度X線源の実現の可能性を示すものである。

第4章では、高強度レーザーと固体炭素の薄膜との相互作用シミュレーションを行い、レーザー場が進入できないバルク固体中での電離過程の詳細について解析を行った。その結果、固体中を光速の約1/3の速度で伝播する低価数（1-4価）の高速の電離波を見出した。詳細な解析の結果、この高速で伝播する電離波は、レーザーと直接相互作用する薄膜表面で生成された高エネルギー電子が薄膜中を伝播するときに発生するプラズマ波のチェレンコフ放射場によるトンネルイオン化に起因するものであることを明らかにした。このとき、励起されたプラズマ波は乱流状態になり、このため電離波面には複雑な突起構造が現れ、また乱流のエネルギーは波と粒子の相互作用を通してバルク加熱に寄与することが分かった。この低価数の高速の電離波伝播に続いて、高価数（5-6価）の電離波がゆっくりとした時定数で固体中を伝播することが分かった。これは急峻な温度勾配下での熱伝導に寄与する高速の非熱的電子による衝突電離に起因するものであり、熱波の伝播と電離過程が結合して電離波面を形成する複雑な物理機構を明らかにしている。

5章では、本研究で行った高強度極短パルスレーザーと物質との相互作用シミュレーションとその理論解析に関して得られた主要な結論と今後の課題について述べている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、近年著しい発展を見せているフェムト秒オーダの高強度極短パルスレーザーと物質との相互作用を解明するために行った、原子過程や緩和過程を取り入れた粒子モデルに基づくシミュレーションコードの開発とレーザー照射されたクラスターおよび固体薄膜の電離ダイナミクスと構造に関する解析を行い、以下に示す重要な知見を得ている。

- 1) プラズマ粒子手法を基礎に、様々な波長領域の電磁場や粒子衝突による原子過程、および電子・中性粒子間や荷電粒子間の衝突・緩和過程を取り入れた統合的な粒子シミュレーションコードの開発を行い、物質を構成する原子やデバイス内部の媒質のミクロな状態変化と、その下での媒質の線形・非線形分極場や粒子加速などの様々なマクロな集団的相互作用を自己無撞着に解析する新しい方法論を開拓した。
- 2) 開発した粒子コードを用いて、小数多体系として注目されているアルゴンクラスターと高強度レーザーとの相互作用シミュレーションを行い、クラスターの電離過程とそれに伴う膨張ダイナミクスを明らかにした。特に、入射レーザー強度を一桁以上上回る高強度の分極電場がクラスター表面に生成され、この電場によるトンネルイオン化過程により高価数（13-16価）のイオンが生成されることを見出した。また、輻射遷移や自動電離過程を取り入れたレート方程式と粒子シミュレーションを自己無撞着に結合させることにより、非平衡な電子速度分布関数のもとでの電子衝突による内殻（K殻）電離に起因して放射されるX線の評価を行った。この結果、放射X線のスペクトル特性はクラスターの膨張ダイナミクスの影響を強く受け、特にレーザー強度を増大させるとクラスター膨張が促進することから、100フェムト秒以下の高強度極短パルスのX線が得られることを見出した。
- 3) 高強度レーザーと固体炭素との相互作用シミュレーションを行い、レーザー場が進入できない固体中での電離過程の解析を行った。その結果、固体中を光速の約1/3の速度で伝播する低価数（1-4価）の高速の電離波を見出した。この高速で伝播する電離波は、レーザーと直接相互作用する薄膜表面で生成された高エネルギー電子が薄膜中を伝播するときに発生するプラズマ波のチェレンコフ放射場によるトンネルイオン化に起因するものであることが分かった。この低価数の高速の電離波伝播に続いて、高価数（5-6価）の電離波がゆっくりとした時定数で固体中を伝播する現象が見出された。これは急峻な温度勾配下での熱伝導に寄与する高速の非熱的電子による衝突電離に起因するものであり、熱波の伝播と電離過程が結合して複雑な電離波面を形成することが判明した。

以上の研究は、高強度レーザーと物質との相互作用を明らかにするとともに、高輝度X線源や粒子加速など、高強度レーザーの応用研究について重要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20年2月21日に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。