

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目 Study of nonlinear structures and dynamics in collisionless plasmas
created by the interaction between high power laser and cluster medium
(高強度レーザーとクラスター媒質との相互作用により生成する無衝突
プラズマ中での非線形構造とダイナミクスに関する研究)

申請者 松井 隆太郎

最終学歴 平成 31 年 3 月
京都大学大学院エネルギー科学研究科基礎科学専攻
博士後期課程研究指導認定見込

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
(主査) 教授 岸本 泰明

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 中村 祐司

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 田中 仁

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	松井 隆太郎
論文題目	Study of nonlinear structures and dynamics in collisionless plasmas created by the interaction between high power laser and cluster medium (高強度レーザーとクラスター媒質との相互作用により生成する無衝突プラズマ中での非線形構造とダイナミクスに関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、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サブμm領域の粒状物質を含む媒質 (クラスター媒質) との相互作用で生成される相対論領域の高エネルギー密度プラズマの理解を通じて、宇宙における超新星爆発時に背景星間ガスとの境界層で普遍的に見られる衝撃波や高エネルギー宇宙線の発生機構の解明、医療応用を目的とした100MeVを上回る高品質の高エネルギーイオンの生成を目的して、プラズマ粒子コードを用いた数値シミュレーションを行った結果とその理論解析をまとめたものであり、以下の6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、近年の高強度レーザー技術の発展とそれに伴う相対論的なレーザー強度領域における電子運動の基礎、高強度レーザーと気体や固体などのターゲット (媒質) との相互作用を支配する各種物理量の定義などについて概説している。次に、高強度レーザーを様々な媒質に照射することで現出する無衝突衝撃波をはじめとする様々な物理現象を紹介するとともに、中でも、医療応用の観点から、レーザー駆動型のイオン加速手法とその特徴について述べている。特に、本研究で対象とするサブμm領域の粒状物質を含むクラスター媒質を用いた場合、他の媒質に比べ高いレーザー吸収とともに効率的に高エネルギーイオンが得られる点に注目し、レーザー駆動型のイオン加速においてクラスター媒質を用いる利点とその意義について論じている。</p> <p>第2章では、レーザーとクラスターとの相互作用において、クラスターの背景に存在するガスが、クラスター中でのレーザー光の長距離伝播や強磁場生成をはじめとした興味深い非線形構造の現出に重要な役割を果たしていることを指摘している。次に、上記の相互作用における背景ガスの役割を明確にするため、背景ガスが存在しない場合のクラスターと高強度レーザーとの相互作用に関するシミュレーションを行い、その結果を議論している。また、クラスターと背景ガスの接触面近傍を無衝突プラズマ境界層と位置付け、背景ガス中でのクラスターのクーロン爆発現象が、超新星爆発時における爆発物質と背景星間ガスとの境界層で見られる衝撃波やそこでの高エネルギー宇宙線の発生機構の解明につながるのと視点を提示している。</p> <p>第3章では、高強度レーザーとクラスターとの相互作用を高エネルギーイオン加速に応用する観点から、高強度レーザーのプラズマへの入射によりその中に生成される無衝突衝撃波の構造とダイナミクスについて議論し、衝撃波面近傍に生成する静電ポテンシャルとマッハ数の関係を導出するとともに、固体水素を用いた実空間1次元のシミュレーションを行い、無衝突衝撃波による高指向性準単色イオンの生成メカニズムの詳細を議論している。次に、クラスターと背景ガスが接する界面 (境界層) に注目し、レーザー照射されたクラスターのクーロン爆発による膨張によって界面近傍に</p>			

生成される無衝突衝撃波が、レーザーの強度によって背景ガス中に伝播する外向き衝撃波になる場合とクラスター中心に伝播・集束する求心衝撃波になる場合の2種類が存在することを示し、それらについて議論している。特に、求心衝撃波を利用することで、平板ターゲットなどを用いて生成した従来の衝撃波では実現困難な高指向性で準単色の高エネルギーイオンが生成される可能性があることなどに言及している。

第4章では、相対論的電磁粒子コード(EPIC3D)を用いて、集光強度が 10^{19} W/cm² 領域の高強度レーザーとサブ μm 領域の炭素クラスターと背景水素ガスからなる媒質との相互作用に関するシミュレーションを行い、炭素クラスターのクーロン爆発による膨張過程において、両者の接触面に形成される無衝突衝撃波の位相空間構造とそれによるイオン加速の素過程について解析を行っている。その結果、両者の相互作用は、①レーザー照射による炭素クラスターのクーロン爆発による電場生成と無衝突プラズマ境界層(衝撃波面)の形成、および、そこでの上流背景水素ガスイオンの圧縮と加速、②炭素クラスターと圧縮された背景水素ガスとの混合領域の形成と2次的非線形波の出現による上流背景水素ガスイオンの反射と加速、③背景水素ガス圧縮面における希薄波の発生と圧縮面の崩壊に伴う炭素クラスター内部の新たな構造形成の3段階で特徴付けられることを明らかにしている。

また、背景水素ガス圧縮面近傍に生成される正負両極の符号を持つ非線形波は、捕捉状態の低エネルギー電子と非捕捉状態の高エネルギー電子の圧力平衡によって保持されるBGK波の特性を有し、位相空間における準平衡状態として、レーザーとの相互作用終了後も長時間に渡って保持され、無衝突プラズマ境界層における多様な構造形成の起源になることなどを明らかにしている。

第5章では、高純度・高エネルギー陽子線の生成を目的として、集光強度が 10^{21-22} W/cm² の高強度レーザーと μm 領域の水素クラスターとの相互作用を再現する3次元の粒子シミュレーションを行った結果をまとめている。その結果、①クラスター表面のレーザー照射側での三日月形状の無衝突求心衝撃波の形成、②クラスター中心への衝撃波の伝播・集束と衝撃波加速、③レーザーの相対論的透明化に伴う光圧とクラスター表面で生成されるシース電場による追加速で特徴付けられるクラスターの内部・外部自由度に伴う多段階的な素過程を自己無撞着に同期させることによって、医療応用可能な200 MeV 超級・高指向性準単色陽子線を生成できることを示している。

第6章では、高強度レーザーとクラスター媒質との相互作用による、異なった物質が接する界面(境界層)での様々な構造形成、および、高エネルギーイオンの生成メカニズムに関する本研究の主要な成果を要約し、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、集光強度が 10^{21-22} W/cm² 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サブ μ m領域の粒状物質を含む媒質(クラスター媒質)との相互作用で生成される相対論領域の高エネルギー密度プラズマの研究を通して、宇宙における超新星爆発時に背景星間ガスとの境界層で普遍的に見られる衝撃波や高エネルギー宇宙線の発生機構の解明、医療応用を目指した100MeVを上回る高品質の高エネルギーイオンの生成を目的したものであり、以下に示す結論を得た。

1) 相対論的電磁粒子コードを用いて、集光強度が 10^{19} W/cm² 領域の高強度レーザーとサブ μ m 領域の炭素クラスターを含む背景水素ガスからなる媒質との相互作用に関するシミュレーションを行い、両者の接触面に形成される無衝突プラズマ境界層の位相空間構造と衝撃波の形成過程について調べた。その結果、相互作用は、①レーザー照射によるクラスターのクーロン爆発による電場生成と背景ガスイオンの圧縮による無衝突衝撃波の形成、②クラスターと圧縮背景ガスとの混合領域(境界層)の形成と正負両極の符号を持つ 2 次的な非線形波の出現による背景ガスイオンの反射と加速、③背景ガス圧縮面における希薄波の発生と圧縮面の崩壊に伴うクラスター内部の新たな構造形成 の 3 段階の過程で特徴付けられることを明らかにした。

2) 上述 1) の背景水素ガス圧縮面近傍に生成される非線形波は、捕捉状態の低エネルギー電子と非捕捉状態の高エネルギー電子の圧力平衡によって保持される BGK (Bernstein-Greene-Kruskal) 波の特性を有し、位相空間に渦構造を持つ運動論的な準平衡状態として、レーザーとの相互作用後も長時間保持され、無衝突プラズマ境界層における多様な構造形成の起源になることを明らかにした。

3) 高純度・高エネルギー陽子線の生成を目的に、集光強度が 10^{21-22} W/cm² の高強度レーザーと μ m 領域の水素クラスターとの相互作用の 3 次元の粒子シミュレーションを行った。その結果、①クラスター表面のレーザー照射側での三日月形状の無衝突求心衝撃波の形成、②クラスター中心への衝撃波の伝播・集束と衝撃波加速、③レーザーの相対論的透明化に伴う光圧とクラスター表面で生成されるシース電場による追加速 で特徴付けられる多段階的な素過程を自己無撞着に同期させることによって、医療応用可能な 200 MeV 超級の高指向性準単色陽子線を生成できることを示した。

上記の研究は、高強度レーザーとクラスター媒質との相互作用により、超新星爆発時の衝撃波や高エネルギー粒子の生成機構を中心に、異なった物質が接する境界層が様々な構造形成や新機能創出に果たす役割の解明、従来手法では実現困難な医療・産業応用に資する高エネルギーイオン源の開発などにつながる成果である。

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31年2月22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。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、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： 年 月 日以降