

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540494

研究課題名(和文)

高強度短パルスレーザーと巨大分子・クラスター・ドロップレットとの相互作用

研究課題名(英文)

Interaction between ultraintense laser and molecular, cluster, and droplet

研究代表者

村上 匡且(MURAKAMI MASAKATSU)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授

研究者番号：80192772

研究成果の概要：

プラズマからの電磁波の発生や局所電場によるイオン加速の振る舞いを定量的に記述するため、固体ターゲットにレーザーを照射し分子による吸収からプラズマ膨張に到る一連のプロセスを明らかにした。またこのための分子動力学シミュレーションコードを開発し、イオン加速のダイナミクスを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	600,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ・核融合、モデル化

1. 研究開始当初の背景

数 μm から数十 μm 程度のサイズの薄膜ターゲットやドロップレットに超高強度レーザーパルス照射すると、核子あたり数～数十MeVのエネルギーのイオンやテラヘルツ波が発生することが知られている。局所的に電荷中性から大きくはずれることによって生成された静電場ポテンシャルによってイオンが強く加速されるというのが底辺の理解であるが¹、その基本的な発生メカニズムは未だ解明されていないのが現状である。卓上型のテラワットレーザーが普及したことや、医療、計測、診断、エネルギー開発といった多岐に渡る応用の可能性

がクローズアップしてきたことから、その研究は急速に盛んになってきている。

2. 研究の目的

a. コード開発

プラズマからの電磁波の発生や局所電場によるイオン加速の振る舞いを定量的に記述するためには、固体ターゲットにレーザーを照射し分子による吸収からプラズマ膨張に到る一連のプロセスを考慮する必要がある。このための分子動力学シミュレーションコードを開発する。

b. 基礎過程の階層化

レーザー照射の対象としては、分子、クラスター、ドロップレットというサイズの異なるターゲットを考える²。このとき、システムには (i) スキンデプス (ii) デバイ長 (iii) 振動距離 (iv) ターゲットサイズという4つの特性長が存在する。上記のようにターゲットサイズが大きく変わるとき、システムの振る舞いを支配する特性長間の大小関係と、それに対応した支配的な加速機構が当然対応してくる事が予想される。このことを理論モデル、粒子シミュレーションによって階層化を明確にし、各階層間の支配的加速機構を明らかにする。

c. イオン加速1: 多種イオン系におけるイオン加速機構の解明

単種イオンからなるプラズマ膨張の厳密な記述はつい最近になって厳密な理論モデルが構築された³。応用の観点からより興味があるのは多種イオン系におけるイオンのエネルギースペクトルである。現在の所、実験結果はあるものの、それらを振る舞いは説明できていない。そこで、上記の単種イオンの理論モデルを多種イオン系に拡張し、併せて粒子シミュレーションによりその加速機構を明確にする。

d. イオン加速2: 密度上昇を伴う加速機構の解明と比例則の確立

レーザー/ドロップレット相互作用においては、レーザー光の動重力によりプラズマが圧縮され高強度電場ができ、GeVイオン加速が生じる⁴。これは、真空中に飛散した電子雲に引かれて加速する従来のシナリオと大きく異なる。したがって、超高強度レーザーの動重力によって密度の空間プロファイルがどう変調され、結果としてイオン加速にいかなる影響が現れるか、そのプロセスを明らかにすると共に主要パラメータに対するイオン加速比例則を確立する。

e. 放射の定量評価

特にクラスターという中間的なサイズのターゲットからは (i) クラスター内に閉じ込められた電子の振動に伴う分極放射 (ii) 短パルスクラスター相互作用によるテラヘルツ領域の放射、という異なる

放射が期待される。粒子シミュレーションによって、クラスターのサイズと密度、照射レーザー強度といった基本パラメータと放射強度との相関を明らかにする。

3. 研究の方法

ターゲットサイズが大きく変わるとき、システムの振る舞いを支配する特性長間の大小関係と、それに対応した支配的な加速機構が当然対応してくる事が予想される。このことを理論モデル、粒子シミュレーションによって階層化を明確にし、各階層間の支配的加速機構を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 電荷中性近似による等温膨張モデルを使ったイオンスペクトルの解明
電荷中性近似を用いて有限質量プラズマの真空中への膨張を記述する理論モデルを構築した。このモデルの新規性は、それまで殆どの理論が半無限平板のようプラズマに対する記述に終始していたのに対し、円筒および球幾何形状の下でのプラズマ膨張を記述している点にある。更にこの理論モデルから予測されるイオンエネルギースペクトルを、2つの異なる研究機関から報告された実験結果と比較した結果、高い精度で一致する事を示した。

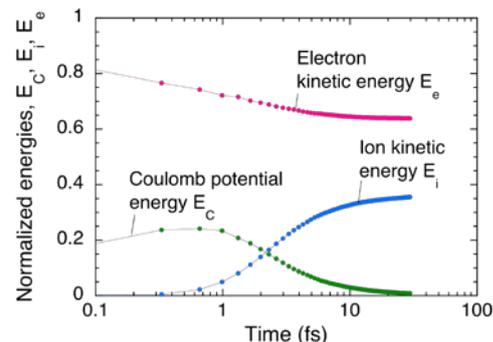


図1 エネルギーの時間発展

(2) 電荷非中性を考慮した系における厳密な自己相似解の発見と最大イオンエネルギーの定式化

従来のモデルにおいては、電荷中性を仮定してプラズマの振る舞いを記述し

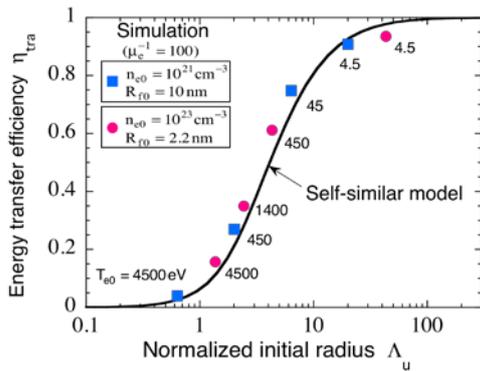


図2 エネルギー輸送効率

てきた。換言すれば電子密度に対する良く知られたボルツマン関係を天下一に遵守し、ポアソン方程式を排除してきた。ところが最近、本申請者等はポアソン方程式を考慮した系でのプラズマの真空中への膨張を記述する厳密な自己相似解が発見した。これにより、従来不明であった真空中の電子密度分布や最外イオンの位置、さらには最大イオンエネルギーを定式化することができた。

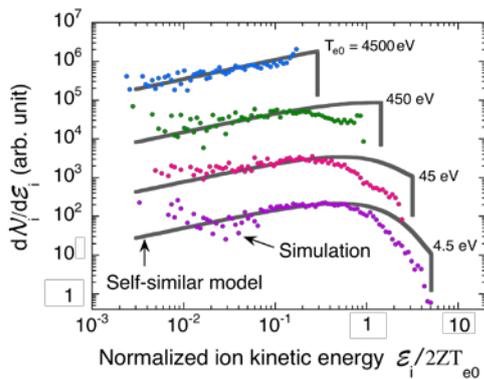


図3 エネルギースペクトル

(3) 単色イオンの大量生成

近年、超高強度・長短パルスレーザー技術が急成長を遂げている。照射強度 $> 10^{16} - 10^{17} \text{ W/cm}^2$ のレーザーを10-100 nmサイズのナノクラスターに照射すると、レーザーエネルギーを吸収した電子は真空中に爆発的に飛散する。その結果、中心には電子に比べ遥かに重いイオン球が取り残されるが、これらのイオンも強大なクーロン反発力により、外径方向に加速される(クーロン爆発)。このクーロン爆発は、近年、癌セラピーや中性子源生成、イオンビームプローブとい

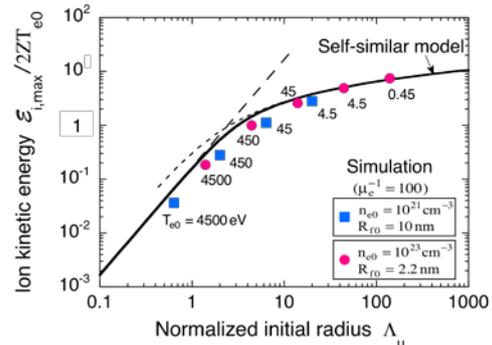


図4 イオンの最大エネルギー

った様々な用途として期待されるイオン加速のための一手段として注目されている。特に、こうしたイオンビームの品質として要求される重要なファクターとして「単色性」が挙げられる。例えば、将来の癌治療に対して要求される単色精度(注)は $\epsilon = 1\%$ 程度内とされている。このように効率良くエネルギーの揃ったイオンビーム源を生成することは幅広い応分野へのインパクトが期待される。図5にも示されるように、不純度が変化するとともにスペクトルの形状も変化することがわかった。

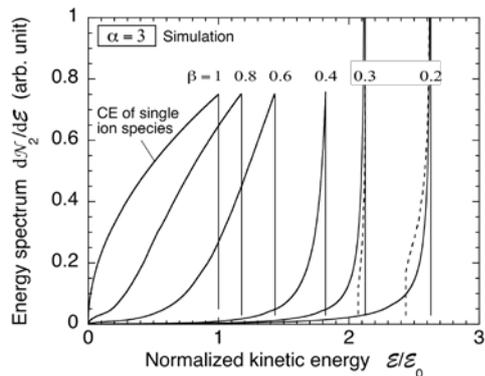


図5 エネルギースペクトルの不純物依存性

今回の研究成果は、単色(quasimono-energetic)ビーム生成のための、二原子からなる球状ナノクラスターの密度比や密度配位の最適化に関するものである(その最適化構造を実際にどう生成するかについては触れていない)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

(1) M. Murakami and M. Tanaka, "Nanocluster explosions and quasimonoenergetic spectra by homogeneously distributed impurity ions", Phys. Plasmas 15, (2008) 082702. 査読有り

(2) M. Murakami and M. Tanaka, "Ion acceleration due to explosions of nanoparticles driven by thermal electrons", J. Phys.: Conf. Ser. **112**, (2008) 042074. 査読有り

(3) M. Murakami and M. M. Basko, "Self-similar plasma expansion of a limited mass into vacuum", J. Phys. IV France 133 (2006) 329-334. 査読有り

[学会発表] (計 8 件)

(1) "Optimization of Nanocluster Structure for Mass Generation of Quasi-monoenergetic Ions in Coulomb Explosions", M. Murakami, The Second International Symposium on Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied to Science, Industry and Medicine, Jan 19-23, 2009, Kizu, Japan

(2) "Ion acceleration due to plasma expansion of non-quasi-neutral finite-mass into vacuum" (oral) M. Murakami and M. Tanaka, Physics of high energy density in matter, Jan. 28-Feb. 1, 2008, Hirschegg, Austria

(3) "Ion acceleration due to expansion of non-quasi-neutral finite-mass into vacuum" (invited), M. Murakami and M. Tanaka, International Symposium on Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied for Science, Industry and Medicine, Sep. 17-20, 2007, Kizu, Japan.

[図書] (計 1 件)

"Applications of Laser Plasma Interactions (Plasma Physics)", Shalom Eliezer 編著, Taylor & Francis 出版 (2008/12/4)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

"レーザー照射による単色イオンビーム生成のための二原子混合ナノクラスター構造" 発明者: 村上匡且、片井隆志、川嶋利幸、菅博文、権利者: 同上、出願年月日: 平成 21 年 1 月 16 日、国内特許、番号: 2008-0670

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 匡且 (MURAKAMI MASAKATSU)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授

研究者番号: 80192772

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

西原 功修 (NISHIHARA KATSUNOBU)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員

研究者番号: 40107131