

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540505

研究課題名(和文)クーロン爆発による高エネルギーイオンの単色化とコンパクト中性子源に関する理論研究

研究課題名(英文)Theoretical Study on Monoenergetic Ion Generation by Coulomb Explosion

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・教授

研究者番号：80192772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：100ナノメートルサイズの球状のクラスターターゲットを考える。このクラスターターゲットを超高強度・超短パルスのレーザーで照射すると、殆どの電子がまず吹き飛ばされ、残されたイオン同士のクーロン反発力に依るクーロン爆発が起こる。このクラスターターゲットが2種の異なる原子で構成される場合、その混合比を最適化する事で生成される高エネルギーイオンのエネルギースペクトルを準単色化できることを理論とシミュレーションによって明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Coulomb explosion of spherical ion clusters is studied, which are composed of homogeneous two-species light and heavy ions. A simple analytical model is developed to describe the explosion performance in terms of two dimensionless parameters, the charge-over-mass ratio, and the charge density ratio. One-dimensional kinetic numerical model is performed to compare with the analytical model and to evaluate the energy coupling efficiency of quasimonoenergetic ion generation. It is crucial to perform an o -Coulomb-potential profile of the light ions in the cluster for efficient generation of quasimonoenergetic ions.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：クーロン爆発 イオン加速 超高強度レーザー

1. 研究開始当初の背景

照射強度： 10^{18} - 10^{21} W/cm²、パルス幅：10-100fs
といったパラメータを持つ超高強度超短パルスレーザーを物質に照射することにより、数十MeVクラスの高エネルギーイオンが生成することは実験的に良く知られている。特に、エネルギースペクトルがシャープなピークを持つ（いわゆる単色の）高エネルギーイオンビーム生成は、癌治療、プロトン駆動高速点火核融合、コンパクト中性子源といった極めて魅力的な将来応用に繋がることから、過去十数年、各国の機関がしのぎを削って研究している。そうした研究の過程で明らかにされてきたのがTNSA(Target Normal Sheath Acceleration)と呼ばれる加速機構である[1]。TNSAでは、レーザー照射面の対面である平板ターゲットの裏面側から真空中に向けてPonderomotive力などで電子が吹き飛ばされ、これら真空中の電子雲に起因する強力な電場によって裏面のイオンが真空中に加速されるというのがその基本的理解であるが(図1参照)、主要物理パラメータに関する定量的なモデル化には至ってはいなかった。その理由は、多くの解析的手法が旧来通り準中性プラズマを仮定してきたために上記に示した強い電荷分離によるイオン加速を本質的に表現し得なかった事による。

上記のTNSAイオン加速の定量的解明に向け、本応募者は電子・イオンの電荷分離効果を厳密に考慮した2流体の膨張運動に対する新たな自己相似解を発見し、イオン加速問題に関する理論モデルを構築した。当理論モデルは、非中性プラズマ膨張によるイオン加速物理を定性的に理解するのみに留まらず、それら種々の振る舞いを定量的に予測できるという点で、関連研究者等から高い評価を受けている(図2参照；参考文献[2,3]、論文引用件数計54件、2009.09.24現在、Web of Scienceより)。さらに現在では、平板ターゲットに対する実験で円偏光レーザーや時間整形パルスなど様々な工夫が提案される中、異なる材質を二重構造にすることにより単色化の向上を図ろうとする試みが主流となってきているが、その単色化効率は実際の応用には程遠いのが現状であった。

2. 研究の目的

100nm～数 μ m程度のサイズのクラスター・ターゲットに超高強度レーザーを照射すると、クラスターを構成するほぼ全ての原子が電離するだけでなく、電離した電子の大半は瞬時にクラスターの遥か遠方に吹き飛ばされる。その結果取り残されたイオンクラスターは、

自身の強力なクーロン反発力により、全粒子が四方に加速・飛散する「クーロン爆発」と呼ばれる現象が起きる。本研究では、この際生じるMeV-GeVといった高エネルギーを持つイオン群がエネルギーレベルのそろった単色スペクトルで且つ高い効率で生成されるべく、クラスターの内部構造と超高強度レーザーを含む系全体の最適設計を行なった。更にこれに基づいた応用研究-中性子源開発-を展開した。

3. 研究の方法

研究組織のコアは本研究代表者(村上：理論&総括)と連携研究者(田中：相対論的分子動力学シミュレーション)から成る。初年度は、非相対論域の現象として発案・予測された2種イオンによる単色化現象に関する詳細な3次元分子動力学(N体)シミュレーションを行ない、相対論領域に拡張するとともに主要物理量に対する比例則を確立した。併せて多種イオン混合の場合へと理論モデルの拡張を行なう。次年度以降は、(1)相対論域への理論モデルおよびシミュレーションの拡張(2)マルチ重水素クラスターによる核融合反応計算のためのモンテカルロコードの開発とコンパクト中性子源開発、(3)イオンビーム収束のための電磁場解析コードの開発と、それを用いた磁場配位の最適設計を行なう。

4. 研究成果

100ナノメートルサイズの球状のクラスターターゲットを考える。このクラスターターゲットを超高強度・超短パルスのレーザーで照射すると、殆どの電子がまず吹き飛ばされ、残されたイオン同士のクーロン反発力によるクーロン爆発が起こる。このクラスターターゲットが2種の異なる原子で構成される場合、その混合比を最適化する事で生成される高エネルギーイオンのエネルギースペクトルを準単色化できることを理論とシミュレーションによって明らかにした。特に、下記の2方式について定量的な研究成果を得た。

(1)平板形TNSAターゲット

これまで最も良く研究されているTNSA(Target Normal Sheath Acceleration)と呼ばれる加速機構に関しての比例則を明らかにした。TNSAでは、レーザーが平板ターゲットに照射されるとその裏面から真空中に向けて電子が吹き飛ばされ、これら真空中の電子雲に起因する強力な電場によって裏面のプロトンが真空中に加速される。

TNSA方式の長所は指向性の良い点であるが、短所は最高エネルギー付近でのプロトンの単色性に欠ける点である。 [Murakami et al., Phys. Plasmas **12**, 062706 (2005)]

(2)球形クーロン爆発ターゲット

平板ターゲットとは対照的に、数百 nm サイズのクラスターと呼ばれる球状ターゲットに超高強度レーザーを照射すると、ターゲット内の電子が、ほぼ瞬時に遠方に吹き飛ばされ、あとには電離にイオンの塊が取り残される。結果としてイオン同士は互いに強力なクーロン反発力により飛散する。この現象はクーロン爆発と呼ばれ、イオン加速の一方式として盛んに研究されて来たが等方的に飛散するので指向性は悪い。構成元素が一種のみのイオンによるクーロン爆発では単色化効率も低い。筆者等は二種の元素を最適化した割合で均等に混合したクラスターだと高い単色性が得られる事を発見した。[特許 2009-005438 (申請中) Murakami et al., Phys. Plasmas **16**, 103108 (2009)]

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 15 件)

- (1) 「Generation of high-quality mega-electron volt proton beams with intense-laser-driven nanotube accelerator」
M. Murakami and M. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 163101 (2013) 査読有
- (2) 「Monoenergetic collimated nano-Coulomb electron beams driven by crossed laser beams」
J. Wang, M. Murakami, S. M. Weng, H. Ruhl, S. Luan, and W. Yu, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 024105 (2013)
- (3) 「Compression of matter by hyperspherical shock waves」
M. Murakami, J. Sanz, and Y. Iwamoto, *Euro. Phys. Lett.* **100**, 24004 (2012)
- (4) 「Production of high-density high-temperature plasma by collapsing small solid-density plasma shell with two ultra-intense laser pulses」
H. Xu, W. Yu, M. Y. Yu, A. Y. Wong, Z. M. Sheng, M. Murakami, and J. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 144101 (2012)
- (5) 「Ultra-intense laser pulse propagation in plasmas: from classic hole-boring to incomplete hole-boring with relativistic transparency」
S. M. Weng, M. Murakami, P. Mulser, and Z. M. Sheng, *New Journal of Physics* **14**, 063026 (2012)
- (3) 「Analytical model for interaction of short intense laser pulse with solid target」
S. X. Luan, W. Yu, M. Y. Yu, G. J. Ma, Q. J. Zhang, Z. M. Sheng, and M. Murakami, *Phys. Plasmas* **18**, 042701 (2011)
- (4) 「Self-consistent stability analysis of spherical shocks」
J. Sanz, S. Bouquet, and M. Murakami, *Astrophysics and Space Science* **336**, 195 (2011)
- (5) 「Optimization of irradiation configuration in laser fusion utilizing self-organizing electrodynamic system」
M. Murakami, N. Sarukura, H. Azechi, et al., *Phys. Plasmas* **17**, 082702 (2010)
- (6) 「Illumination uniformity of a capsule directly driven by a laser facility with 32 or 48 directions of irradiation」
M. Temporal, B. Canaud, S. Laffite, B. J. Le Garrec, and M. Murakami, *Phys. Plasmas* **17**, 064504 (2010)
- (7) 「Laser-driven quasimonoenergetic proton burst from water spray target」
B. Ramakrishna, M. Murakami, M. Borghesi, et al., (以下 6 名) *Phys. Plasmas* **17**, 083113 (2010)
- (8) 「Illumination uniformity of a capsule directly driven by a laser facility with 32 or 48 directions of irradiation」
M. Temporal, B. Canaud, S. Laffite, B. J. Le Garrec, and M. Murakami, *Phys. Plasmas* **17**, 064504 (2010)
- (9) 「Experimental Evidence of Impact Ignition: Hundred-Fold Increase in Neutron Yield by Impact Collision」
H. Azechi, T. Sakaiya, T. Watari, M. Murakami 以下 12 名 *Phys. Rev. Lett.* **102**, 235002 (2009)
- (10) 「Ignition and Burn Dynamics of DT Fuels in Impact Fast Ignition」
T. Johzaki, M. Murakami, H. Azechi and K. Mima, *J. Plasma Fusion Res. Series* **8**, 1204 (2009)
- (11) 「Efficient generation of quasimonoenergetic ions by Coulomb explosions of optimized nanostructured clusters」
M. Murakami and K. Mima, *Phys. Plasmas* **16**, 103108 (2009)
- (12) 「Plasma physics and laser development for the Fast-Ignition Realization Experiment (FIREX) Project」
H. Azechi, K. Mima, Y. Fujimoto, S. Fujioka, H. Homma, M. Murakami 以下 7 名, *Nucl. Fusion* **49**, 104024 (2009)
- (13) 「Fast Ignition by DEtonation in a Hydrodynamic Flow」
S. Yu. Gus'kov and M.

Murakami, Journal of Russian Laser Research
30, 279 (2009)

〔学会発表〕(計 20 件) 以下は招待講演

(1) 「ナノチューブ加速器によるプロトン加速」
村上匡且、田中基彦

プラズマ核融合学会・第30回年会(東工
大、12/3, 2013)

(2) 「High-Quality Mega-Electron Volt Proton
Beams Generated by Nanotube

Accelerators」*3rd International Conference
Nanomaterials: Applications & Properties*

(アルシュタ/ウクライナ, 9/19, 2013) M.
Murakami, M. Tanaka

(3) 「Selected Topics of Laser-Matter Interaction
Physics」

M. Murakami, Summer School on Plasma
Physics (上海/中国, 8/2, 2012)

(4) 「High Compression of Matter by
Hyperspherical Shock」

M. Murakami, 10th Direct Drive ICF Workshop
(プラハ/チェコ, 5/29, 2012)

(5) 「激光エクサによる高強度プラズマ物理」
村上匡且、日本物理学会第66回年次大会・

ビーム物理領域合同シンポジウム(関西学
院大、3/26, 2011)

(6) 「Laser Fusion Research at ILE, Osaka」M.
Murakami,

*8th Asia Plasma and Fusion Association
[APFA2011]*(桂林/中国 11/1, 2011)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上匡且(49)

研究者番号: 80192772

(2) 研究分担者

田中基彦(57)

研究者番号: 80167501