

陽子線計測の統計的有意性に基づいたレーザー駆動イオン加速の高強度化

Improvement of intensity and energy of laser-accelerated protons from hydrogen clusters based on the statistical significance

金崎 真聡¹⁾ 浅井 孝文¹⁾ 中川 貴斗¹⁾ 鍛冶 賢志¹⁾ 田邊 寛之¹⁾ 井上 千裕¹⁾
藤田 泰樹¹⁾ 望月 政一郎¹⁾ 安倍 勇輝²⁾ 南 卓海²⁾ 境 健太郎²⁾
岩崎 滉²⁾ 姫野 公輔²⁾ 田口 智也²⁾ 小田 和昌²⁾ 鈴木 蒼一郎²⁾
郡 英輝²⁾ Tatiana Pikuz²⁾ 時安 敦史³⁾ 田中 周太⁴⁾ 山内 知也¹⁾
蔵満 康浩²⁾ 桐山 博光⁵⁾ 福田 祐仁⁵⁾

Masato KANASAKI Takafumi ASAI Takato NAKAGAWA Takashi KAJI Hiroyuki TANABE

Chihiro INOUE Taiki FUJITA Seiichiro MOCHIZUKI Yuki ABE Takumi MINAMI Kentaro SAKAI

Kou IWASAKI Kousuke HIMENO Tomoya TAGUCHI Kazumasa ODA Souichirou SUZUKI

Hideki KOHRI Tatiana PIKUZ Atsushi TOKITASU Shuta TANAKA Tomoya YAMAUCHI

Yasuhiro KURAMITSU Hiromitsu KIRIYAMA Yuji FUKUDA

¹⁾神戸大学 ¹⁾大阪大学 ¹⁾東北大学 ¹⁾青山学院大学 ⁵⁾量研

(概要)

高強度レーザーと物質の相互作用により加速されるイオンの高強度化を目的として、水素及びアルゴンクラスターターゲットを用いた陽子線加速実験を実施した。イオン検出器である固体飛跡検出器 CR-39 とトムソンパラボラスペクトロメータを複数組み合わせ合わせた計測を行い、安定的に数 MeV 級の準単色エネルギーを有する陽子線加速が可能な条件を見出した。イオン計測結果の統計的解析、及び、その他の計測データについては、現在、解析を進めている。

キーワード：レーザー駆動イオン加速、イオン計測、トムソンパラボラ、固体飛跡検出器

1. 目的

近年、高強度レーザー光と物質の相互作用によるレーザー駆動イオン加速は、目覚ましい発展を遂げ、100 MeV に迫るプロトンの加速に成功している[1]。また、理論研究においてもサブ GeV 級のイオン加速が可能な新たなイオン加速メカニズムが提唱されている[2]。レーザーの高強度化や新しいターゲットの開発とともに、加速されるイオンの高エネルギー化が進められることで、例えば、高周波加速器に比べて小型の加速器開発など応用も期待できる。

このような状況下、より高エネルギーで高品質なイオンを発生させるためには、より最適なレーザー光のパラメータなど実験条件を探し出すことが必要となるが、そのためには、実験において複雑に組み合わせられた加速メカニズムの詳細を把握することが最重要課題である。理論研究ではシース場、放射圧、無衝突衝撃波など様々な加速メカニズムが提唱されているが、それぞれのメカニズムでエネルギースペクトルやビーム指向性が異なる。逆に言えば、加速されたイオンの空間分布に加え、核種や入射エネルギーを正確に計測し、理論研究の結果と比較すれば、加速メカニズムの解明につなげることができる。

本研究では、高強度レーザーと水素クラスターの相互作用により加速される陽子線の高強度化を主目的とし、集光スポット内のクラスターサイズや数密度等を定量的に評価することに加え、陽子線計測結果の統計的有意性に基づいて実験パラメータを走査することにより、安定した陽子線発生を目指した実験を実施した。また、近臨界密度プラズマ中に自己生成されるキロテスラ級の磁場がイオン加速に与える影響を評価することを目的とし、ファラデー回転を利用した磁場計測を試みた。

2. 方法

高強度レーザー J-KAREN-P、及び、クラスターターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速実験

を長焦点チャンバーにて実施した。

ターゲットとして、ヘリウム冷凍機を用いて数十 K 程度にまで冷却したノズルから高純度の水素ガスを噴射して生成する水素クラスターにより陽子線加速を行なった。また、水素とアルゴンの混合ガスを噴射することで、水素を背景ガスとするアルゴンクラスターターゲットにより、陽子線及びアルゴンイオンの加速を行なった。レーザー光とクラスターターゲットの相互作用領域に、メイン光の進行方向と垂直な方向からプローブ光を導入し、拡大光学系を組むことで、相互作用の様子を観察した。また、同プローブ光を利用し、ファラデー回転を利用した磁場計測を行なった。

イオン計測では、エッチング型固体飛跡検出器である CR-39 を用いた陽子線及びアルゴンイオンの計測を行なった。レーザー光が直接入射するのを避けるためにアルミホイルで覆った CR-39 を、レーザー進行方向に対して 0 度から 90 度の範囲で集光点を囲むように設置し、加速されたイオンの異方性について調べた。また、リアルタイムイオン計測が可能な Micro Channel Plate を検出部に持つトムソンパラボラスペクトロメータ (TPS) を複数台利用し、レーザーショットごとのイオンのエネルギースペクトル計測を行なった。また、トムソンパラボラの検出部に CR-39 を設置し、その CR-39 をステージで動かすことで、ショットごと、もしくは、クラスター生成条件ごとのエネルギースペクトルを固体飛跡検出器でも取得した。その他、X 線スペクトル計測、誘導コンプトン散乱計測、シンチレーション検出器による高エネルギーイオン計測体系の実証試験も同時に実施した。

3. 結果及び考察

レーザー駆動イオン加速実験は、2022 年 2 月 28 日から 3 月 18 日に行われたため、取得したデータのほとんどが現在も解析中である。ここでは計測結果の一例として、(1)レーザークラスター相互作用領域のイメージング、(2)アルゴン・水素混合ガスターゲット時の背景水素ガス加速、(3)MeV 級の非熱的陽子線加速について紹介する。

(1)レーザークラスター相互作用領域のイメージング

図 1 は水素クラスターターゲット(ノズル温度 30 K、ガス圧力 8 MPa)に J-KAREN-P レーザーを約 20 J で照射したときのイメージング画像である。ここでは、プローブ光としてメインレーザーの第二高調波(400 nm)を用い、カメラ直前には 400 nm のバンドパスフィルタを設置している。紙面左側からメインレーザーが入射し、ガスジェットは紙面上側から噴射されている。レーザー集光スポット内ではメインレーザーとクラスターの非線形相互作用により、第二高調波が発生していることがわかり、その情報から集光スポット内のクラスター数密度を推定可能である。また、この光がプローブ光に比べて数桁強度が高いために、純粋にプローブ光のファラデー回転角を取得することは困難であると予想される。しかしながら、一部のショットでレーザー軸を境に偏光面の回転方向が逆転しており、磁場計測の手掛かりになる可能性があるため、今後慎重に解析を行う予定である。

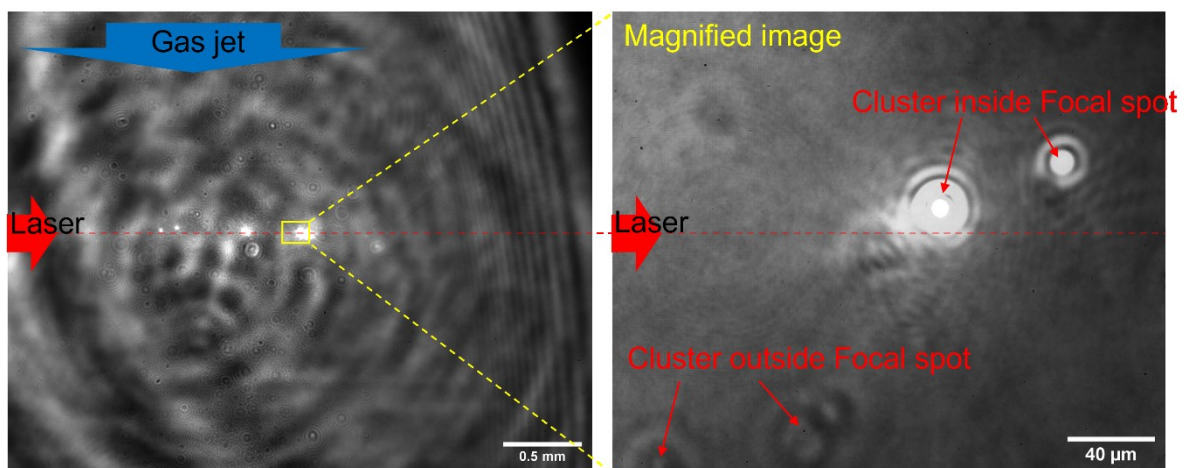


図 1 レーザークラスター相互作用領域のイメージング

(2) アルゴン・水素混合ガスターゲット時の背景水素ガス加速

図 2 はアルゴン・水素混合ガスターゲット(ノズル温度 90 K、ガス圧力 8 MPa) に J-KAREN-P レーザーを約 20 J で照射したときの TPS(設置位置：レーザー軸に対して 57 度)取得画像である。まず、陽子線につい

て、最高 2 MeV 程度までの熱的なエネルギースペクトルが観測された。ノズル温度 90 K の場合、アルゴンのみがクラスター化し、サブマイクロメートルオーダーの水素クラスターは生成されないため、理論上クーロン爆発による MeV クラスの陽子線は発生しない。したがって、この陽子線はアルゴンクラスターの電場によって加速された背景ガス水素プラズマ起因のものと考えられる。アルゴンのエネルギースペクトルについては低価数のアルゴンイオンからフルストリップの 16 価以上のアルゴンイオンが確認できる。特筆すべきは高価数のスペクトルが準単色であり、低価数のものは一度粒子数が減少するものの、1 価に近づくと再びその粒子数が増加傾向にある点である。背景水素ガス加速、特異的な価数ごとのアルゴンイオンエネルギースペクトルについては、今後 Particle-in-cell シミュレーションの結果と比較しつつ、その加速メカニズムについて検討していく予定である。

(3) MeV 級の非熱的準単色陽子線加速

図 3 は水素クラスターターゲット(ノズル温度 30 K、ガス圧力 8 MPa)に J-KAREN-P レーザーを約 20 J で照射したときの TPS(設置位置：レーザー軸に対して 3 度)取得画像である。この画像からレーザー進行方向に 2 MeV 程度の準単色陽子線が発生していることがわかる。これ以外にも、準単色や複数ピークを有する非熱的なエネルギースペクトルが連続してレーザー進行方向に設置した TPS で観測された。また、固体飛跡検出器でも準単色成分の検出に成功しており、ユニークな加速メカニズムによってレーザー進行方向に陽子線加速が起こっていることが確認された。一方で、レーザー軸に対して 57 度方向に設置した TPS では熱的なエネルギースペクトルが得られており、異方性が認められている。現在、Particle-in-cell シミュレーションを導入して実験結果の再現、及び、レーザークラスター相互作用における非熱的準単色陽子線加速機構解明を進めている。

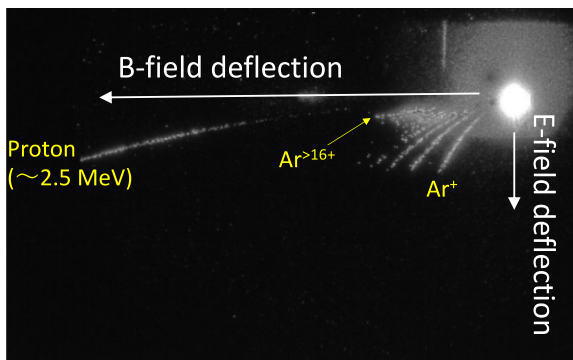


図 2 アルゴン・水素混合ターゲットを用いた場合の TPS(設置角度 57 度)取得画像

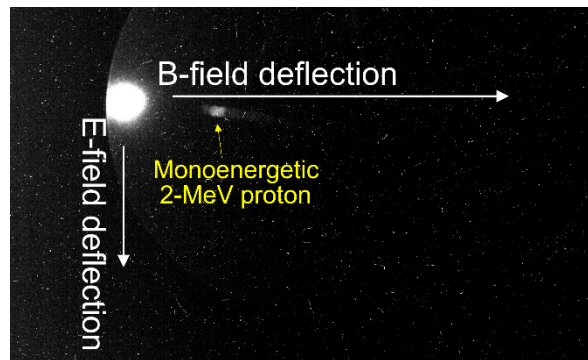


図 3 水素クラスターターゲットを用いた場合の TPS(設置角度 3 度)取得画像

今後、相互作用領域のイメージング画像や固体飛跡検出器及び TPS で得られたイオン計測の結果について統計解析を含む多角的な解析を進める予定である。

4. 引用(参照)文献等

[1] A. Higginson et al., Nat. Commun. 9, 724 (2018).
 [2] R. Matsui et al., Phys. Rev. Lett. 122, 014804 (2019).