

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の高エネルギー化

(原子力機構・関西・光医療セ^A、ロシア科学ア^B、大阪大院・工・レーザー研^C、神戸大院・海事科学^D) ○福田祐仁^A、A.Ya. Faenov^{A,B}、反保元伸^A、T.A. Pikuz^B、中村龍史^A、神門正城^A、林由紀雄^A、本間隆之^A、川瀬啓悟^A、余語覚文^A、榊泰直^A、A.S. Pirozhkov^A、小倉浩^A、森道昭^A、T.Zh. Esirkepov^A、ジェームス甲賀^A、A.S. Boldarev^B、V.A. Gasilov^B、A.I. Magunov^B、兒玉了祐^C、山内知也^D、P.R. Bolton^A、加藤義章^A、田島俊樹^A、大道博行^A、S.V. Bulanov^{A,B}

【序】 高強度フェムト秒レーザーを集光して物質に照射することにより、ミクロン程度の空間内に極めて強い電磁場(テラ(=10¹²)ボルト/メートル、メガ(=10⁶)ガウス)が生成する。このような強力な電磁場を用いることによるレーザー駆動の粒子加速は、装置の卓上レベルの小型化、従来の加速器では実現できないフェムト秒の極短パルスの量子ビーム生成が可能、といった特長を有する。特に、レーザーを用いたイオン加速手法の開発は、粒子線がん治療装置の小型化、低価格化の観点から注目を集めている。しかし、レーザー駆動イオンビームの医学利用のためには、イオンビームの高エネルギー化と単色化、レーザー装置の高繰り返し化、レーザー駆動イオンビームの特徴に即したビーム伝送・照射系の最適化など、解決すべき多くの課題がある。

我々は、サブ臨界密度プラズマ中で生成する磁気渦に起因する加速電界により、イオンが高エネルギーに加速される、という磁気イオン加速モデル[1]に基づいた従来とは異なる手法によるレーザー駆動イオン加速の高エネルギー化に取り組んでいる。本研究では、サブ臨界密度プラズマを生成させるために、世界に先駆けて、クラスターを含むガスターゲット(以下、クラスターターゲットと呼ぶ)をイオン加速研究に導入し、従来の同規模クラスのレーザー装置を用いた場合よりもはるかに高い加速エネルギーを得ることに成功した[2]。

【実験】 実験には、関西研所有の小型高強度レーザーシステム JLITE-X を用いた。実験装置の概念図を図1Aに示す。実験条件は、レーザーエネルギー150 mJ、パルス幅 40 fs、集光強度は 6×10^{17} W/cm²であった。クラスターターゲットの生成には、特殊な構造を有するコニカルノズルを用いた。真空容器中で、圧力 60 気圧の He ガス(90%)と CO₂ ガス(10%)との混合ガスをノズルから噴出させ、サブミクロンサイズの CO₂ クラスターを生成させた。これにレーザー光を照射したところ、5 mm にわたるレーザー光のガイディングが起こり(図2)、レーザー進行方向に高エネルギーのイオン加速が実現された。

【結果】 固体飛跡検出器 CR39 を用いた解析により、加速されたイオンの核子あたりの最大エネルギーは、ヘリウム、炭素、酸素に対して、それぞれ、10、18、20 MeV/n であることが分かった(図 1C)。高エネルギーイオンの生成は、飛行時間法を用いたイオン検出によっても確認された。

実験結果の解釈のために、2次元のプラズマ粒子コードによるシミュレーションを実施した。その結果、以下のような物理的説明が試みられている。すなわち、レーザーパルスは電子密度 10^{20} cm^{-3} のサブ臨界密度プラズマ中を自己収束効果によりガイドされながら通過し、これに伴い高速の電子がレーザー進行方向に飛び出す。この電子流により、ターゲット裏面に極めて強い準定常磁場($\sim 35 \text{ MG}$)が生じる。磁場強度の時間変化によりターゲット裏面に強力な静電場($\sim \text{TV/m}$)が生じ、これがレーザーパルス幅より長い数ピコ秒程度持続されることで、イオンが高エネルギーに加速される。電子密度 10^{20} cm^{-3} のサブ臨界密度プラズマの生成は、軟 X 線スペクトルの解析(図 1B)からも示されている。このモデルでは、プラズマ密度とその密度勾配の微妙なバランスが、磁気渦発生とイオン加速の性能を決める決定的な要素となっている。クラスターターゲットは、固体密度のクラスターとガスの混合体であることから、このような複雑なプラズマ密度構造を作り出すことを可能にしたと考えられる。

以上のように、我々は、新たにクラスターターゲットをイオン加速研究に導入し、核子あたりの最大エネルギーが 10–20 MeV/n という、従来の同規模クラスのレーザー装置を用いた場合の約 10 倍の加速エネルギーを得ることに成功した。

[1] S.V. Bulanov *et al.*, Plasma Phys. Rep. **31**, 369 (2005),

S.V. Bulanov and T.Zh. Esirkepov, Phys. Rev. Lett. **98**, 049503 (2007).

[2] Y. Fukuda *et al.*, submitted to Phys. Rev. Lett. (2009).

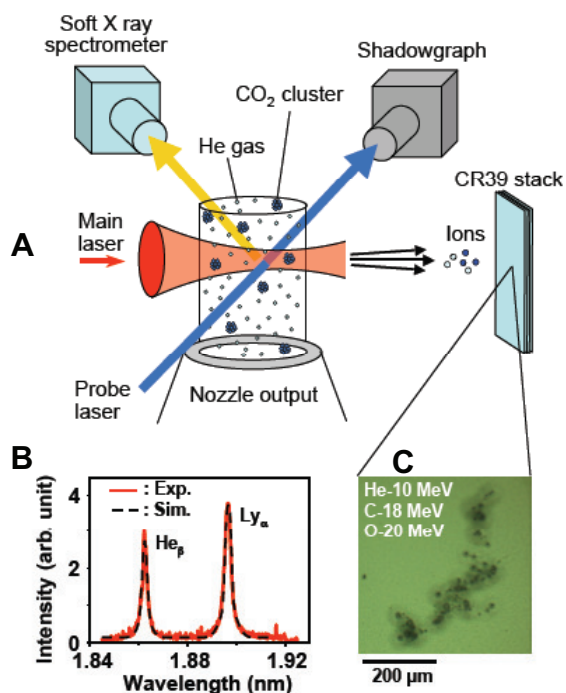


図 1 (A) 実験装置の概略図。(B) 生成したプラズマの軟 X 線スペクトル。(C) 11 枚目の固体飛跡検出器 (CR39) に観測されたイオンシグナル。

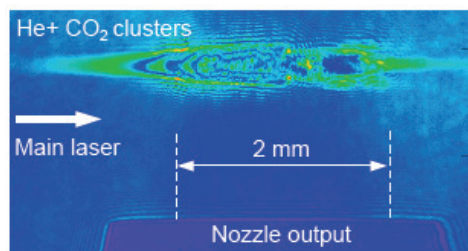


図 2 シャドウグラフ装置で観測された自己収束に起因するレーザー光の長距離 (5 mm) ガイディング。