

## Phase rotation scheme of the ions accelerated by an intense femtosecond laser

S.Nakamura<sup>1</sup>, A.Noda, Y.Iwashita, T.Shirai, A.Yamazaki, M.Tanabe, H.Tongu, M.Ikegami, S.Fujimoto, T.Mihara,  
S.Sakabe M.Hashida, S.Shimizu

Advanced Research Center for Beam Science, Institute of Chemical Research, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

### Abstract

A phase rotation scheme is investigated for the ion beam that is emitted from foil target irradiated by a high repetition (10Hz) high power (~10TW) short-pulse (~50fs) laser. By application of an RF electric field synchronized with the laser pulse, the ion beams in the energy range of  $\pm 5\%$  is expected to be compressed into the range within  $\pm 1\%$  of our goal. The experiment to demonstrate the feasibility of the phase rotation scheme is planned. However, protons with the sufficient energy couldn't be produced.

### 高強度短パルスレーザー起源イオンの位相回転によるエネルギー圧縮

#### 1. はじめに

出力が数TWから数10TWでパルス幅が1psから数10fsの高強度短パルスレーザーを数10 $\mu\text{m}$ 程度に集光し、物質に照射したときに、最大エネルギーが数MeV/uから数10MeV/uの高エネルギーイオンが発生することがわかっている。我々も、これまで、京都大学、東京大学、関西研究所の共同実験において、東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設の高強度(3TW)超短パルス(50fs)レーザーを18 $\mu\text{m}$ (FWHM)に集光し(照射強度 $6 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$ )、金属薄膜に垂直に照射した際、数10keVから1MeV程度の陽子が発生することを確認している<sup>[1]</sup>。その実験において、イオンの発生方向はレーザー進行方向に対しておよそ $\pm 5^\circ$ 以内に集中しており、またエネルギーが大きくなるにつれて個数は指数関数的に減少している。

我々は、このイオンを従来の加速器に入射することで加速器の低エネルギー部分を省略し、加速器の小型化を達成することを目指している。その際、十分なビーム強度を達成するため、目標エネルギーを中心とするイオンにレーザーと同期したRF電場を印加し、加減速させることで位相回転を行い、 $\pm 5\%$ のエネルギー幅のイオンを $\pm 1\%$ 以下に圧縮する試みを進めている。最終的には2MeV/uの $\text{C}^{6+}$ イオンを $10^9/\text{s}$ 生成することが目標であるが、現段階では原理実証として、陽子に対してこの操作を行い、目標エネルギーを中心にエネルギー圧縮することを目指している。

今回、位相回転の実証実験を行うために、大阪大学レーザーエネルギー学研究所(旧レーザー核融合研究センター)のT6-laserを使用し、250keVの陽子を生成することを目指したが、マシンタイム中に達成することができなかった。

#### 2. 実験セットアップ

T6-laserは中心波長800nmのTi:Sapphireレーザーで、

繰り返し周波数は10Hzである。実験期間中のパルスあたりのエネルギーは約110mJ、パルス幅は約130fsであった。このレーザーを焦点距離165mmの軸はずし放物面鏡によって $140 \times 45 \mu\text{m}$ に集光し(集光強度 $2 \times 10^{16} \text{W/cm}^2$ )、厚さ2.5 $\mu\text{m}$ のマイラー( $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ )<sub>n</sub>に $90 \pm 1^\circ$ の入射角で照射した。以下、ターゲットに対してレーザーが進む方向を“前方”、反対側を“後方”とする。

ターゲットから前方に1.2mの位置に位相回転用RF Cavityを設置し、その後ろにイオン検出器としてSakabe型Thomson parabolaイオン分析器<sup>[2]</sup>(TP)にマイクロチャンネルプレート(MCP)を取り付けたものを設置した。ターゲットからTPのピンホールまでの距離は1.6m、ピンホールからMCPまでの距離は58cmである。RF Cavityのビーム軸は直径50mmあり、これをレーザー進行方向に対して $\pm 1\text{mm}$ の精度で合わせ、また、直径0.3mmのTPのピンホールをレーザー進行方向に対して $\pm 0.5\text{mm}$ の精度で合わせた。TPの磁場は40 ~ 1000G、電場は $0 \sim 4 \times 10^4 \text{V/m}$ の範囲で変化させて測定を行った。

#### 3. 実験結果

レーザーが最も集光されている位置にターゲットを設置したときに、高エネルギーのイオンが発生するとは限らない<sup>[3]</sup>ため、ターゲットの位置を前後に移動させながら約80ショットの積算照射を行った。最も高エネルギーのイオンが検出されたのはレーザーの集光点から前方に0.6mmの位置であった。この位置でのMCPの信号を図1に示す。検出されたイオンは、TPの電場と磁場から求めた理論曲線から、陽子、炭素の4価から1価、酸素の2価と1価であることがわかる。陽子の最大エネルギーは45keVで、そのほかの炭素と酸素イオンの最大エネルギーは数keV/u以下であった。原点から遠い方で理論曲線とMCPの信号とがずれているのは、イオンが低エネルギーであるため、TPの電極や磁極の漏れ電場、漏

<sup>1</sup> E-mail: nakamura@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

れ磁場の影響を大きく受けているためだと考えられる。

今回の実験では、レーザーをターゲットのきれいな面に照射した時にはイオンは検出されず、一度照射した後の面に照射した時にイオンが検出された。ターゲットは $2.5\mu\text{m}$ と薄いため、一度レーザーを照射すると穴が開き、その周辺はレーザー進行方向に対してランダムに大きく傾いている。照射強度が $10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$ のオーダーでは、イオンの発生方向はレーザー軸方向ではなく、ターゲット面の法線方向だという報告があり、今回の実験の照射強度でも同様の傾向を示すと考えられる。この実験ではレーザーをターゲットに垂直に照射することで、レーザー軸とターゲットの法線方向とを合わせているため、イオンの角度分布が $\Delta\theta = (\text{レーザー進行方向に対するターゲットの設置誤差}) + (\text{レーザー進行方向に対するTPのピンホールの設置誤差})$ 以上であれば、一度目の照射で生成されたイオンがTPで検出される。この実験において(レーザー進行方向に対するターゲットの設置誤差) =  $\pm 1^\circ$ 、(レーザー進行方向に対するTPのピンホールの設置誤差) =  $\pm 0.5/1.6 \times 10^3 = \pm 3.1 \times 10^{-4} \text{ rad}$ であるから、 $\Delta\theta \approx 1^\circ$ である。今回の実験で、レーザー進行方向にランダムに傾いている二度目の照射においてのみ、イオンを検出できたのは、生成されたイオンの角度分布が $\pm 1^\circ$ 以下であるため、ターゲット面の法線方向がレーザー進行方向と $\pm 1^\circ$ 以下で偶然に重なった時しか、イオンがTPに到達できない事を示している。

これまでの実験において、レーザー進行方向の詳細な

角度分布は測定できておらず、レーザー進行方向とそこから約 $20^\circ$ ごとの角度分布からおよそ $\pm 5^\circ$ 以内という結果が導かれた。今回の実験結果はイオンの角度分布が $\pm 1^\circ$ 以下であることを間接的に示している。同一のレーザーを用いたイオン発生実験では、照射強度 $1.2 \times 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ を達成した際に、 $1 \text{ MeV}$ 以上の陽子の角度分布が $2.6\text{mrad}$ という結果が示されている<sup>[4]</sup>。

#### 4. まとめ

今後、レーザーをより小さく集光させることで照射強度の改善を行い、位相回転の実証実験を行うために必要な $250\text{keV}$ の陽子を生成することを目指す。それとともに、ターゲット面の調整機構の導入と、レーザー進行方向の詳細な角度分布の測定を行っていく。

#### 参考文献

- [1] K.Matsukado, et al., "Energetic Protons from a Few-Micron Metallic Foil Evaporated by an Intense Laser Pulse", Phys. Rev. Lett., 91, 215001, (2003)
- [2] S.Sakabe, et al., "Modified Thomson parabola ion spectrometer of wide dynamic range", Rev. Sci. Instrum., 51, 1314, (1980)
- [3] Y.Wada, et al., "Ion Production Enhancement by Rear-Focusing and Prepulse in Ultrashort-Pulse Laser Interaction with Foil Targets", Jpn. J. Appl. Phys., 43, L996, (2004)
- [4] S.Okihara, et al., "Energetic Proton Generation in a Thin Plastic Foil Irradiated by Intense Femtosecond Lasers", J. Nucl. Sci. Tech., 39, 1, (2002)

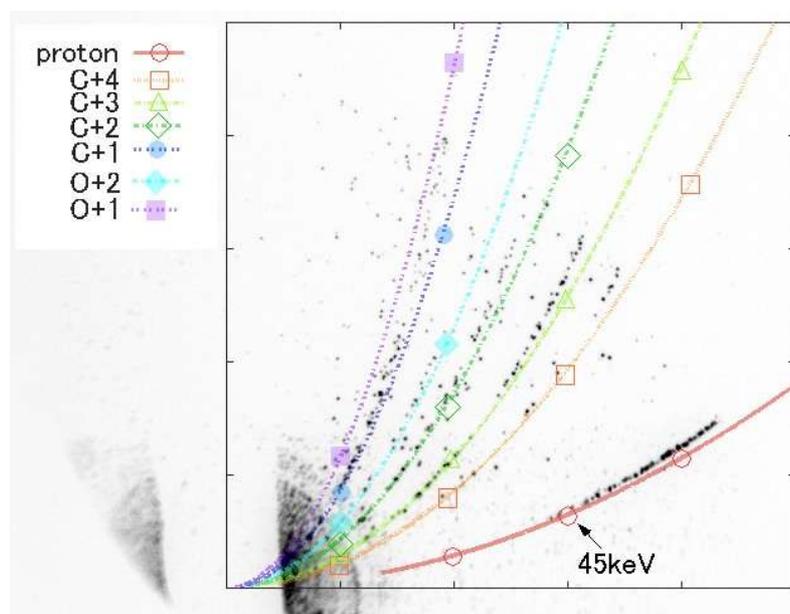


図1 : MCPによって検出したイオンのパラボラ。

陽子の最大エネルギーは約 $45\text{keV}$ で、その他のイオンは数 $\text{keV}/\text{u}$ 以下である。低エネルギー側にカットオフがあるのはMCPの感度面による。

原点付近にみえる同心円状の信号はピンホールを抜けてきたX線、又はプラズマの発光によるもので、最も強い中心付近はMCPの直前に厚さ $5\text{mm}$ の鉛板を設置している。