

## 高強度レーザーによるプロトンの航跡場加速

Experiment on wakefield acceleration of protons  
by using high power laser

諫山 翔伍<sup>1)</sup> 蔵満 康浩<sup>2)</sup> 安部 勇輝<sup>2)</sup> 南 卓海<sup>2)</sup> 境 健太郎<sup>2)</sup>  
田口 智也<sup>2)</sup> 小田 和昌<sup>2)</sup> 鈴木 蒼一郎<sup>2)</sup> 二階堂 颯佳<sup>2)</sup> 倉本 恭誓<sup>2)</sup>  
安井 稔遥<sup>2)</sup> 酒井 優一<sup>2)</sup> 兼安 祐実<sup>2)</sup> 山ノ井 航平<sup>2)</sup>  
福田 祐仁<sup>3)</sup> 今 亮<sup>3)</sup> 桐山 博光<sup>3)</sup> 近藤 康太郎<sup>3)</sup> 陳 仕宏<sup>4)</sup> 金崎 真聡<sup>5)</sup>  
浅井 孝文<sup>5)</sup> 田中 周太<sup>6)</sup>

Shogo Isayama Yashiro KURAMITSU Yuki ABE Takumi MINAMI Kentaro SAKAI Tomoya TAGUCHI

Kasumasa ODA Soichiro SUZUKI Fuka NIKAIIDO Kiyochika KUROMOTO Toshiharu YASUI

Yuichi SAKAI Yumi KANEYASU Kohei YAMANOI Yuji FUKUDA Akira KONDO Hiromitsu KIRIYAMA Kotrato

KONDO Shih-Hung CHEN Masato KANASAKI Takafumi ASAI Shuta TANAKA

<sup>1)</sup>九州大学 <sup>2)</sup>大阪大学 <sup>3)</sup>量研 <sup>4)</sup>台湾国立中央大学 <sup>5)</sup>神戸大学 <sup>6)</sup>青山学院大学

(概要)

宇宙より絶えず飛来してくる高エネルギー宇宙線の生成機構は長年にわたり未解明であり、現在まで様々な加速機構が考えられている。中でも、航跡場加速は超高エネルギー宇宙線 ( $>10^{19}$  eV) の生成機構の有力候補である[1, 2]。一方で、レーザーによるイオン加速では医療応用の目安となる 100MeV 以上のプロトンエネルギーを達成するため現在までに様々な加速手法が試みられているが、未だそのような高エネルギープロトンの生成に成功した実験例はない。もしレーザー航跡場加速をプロトン加速に適用できれば、長距離・長時間にわたってプロトンを加速させることができるため、J-KAREN P レーザーを用いて 100MeV 以上のエネルギーをもつプロトンを生成できる。また、宇宙線の主成分である高エネルギープロトンの生成機構解明にもつながる。本研究では世界初となるプロトンの航跡場加速の実証を試みる。

**キーワード**：航跡場加速、高エネルギープロトン生成、超高エネルギー宇宙線、フォームターゲット

### 1. 目的

レーザーを用いた従来のイオン加速手法 [Radiation Pressure Acceleration (RPA), Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)]には加速限界があり、プロトンを長時間・長距離にわたって加速させるのは本質的に難しい[3-5]。電子加速が実験的に実証されているレーザー航跡場加速 [Laser Wakefield Acceleration (LWFA)]では、プラズマ中を伝搬するプラズマ波を利用するため、加速電場にトラップされた粒子はプラズマ波の伝搬とともに長時間・長距離にわたって加速

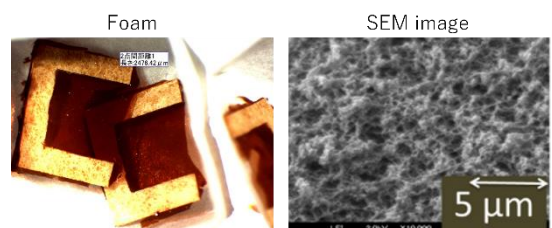


図1 フォームターゲット [C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub> と CH<sub>2</sub>O の縮合重合]. 厚み 100 μm. 平均密度  $n_e \sim 5 n_c$  (正確な密度は非破壊では測れない).

される。したがってレーザー航跡場加速は、レーザーの作る非常に大きな加速勾配と長い加速長を併せ持つ唯一の加速機構である。現在のレーザー施設でプロトンの長時間航跡場加速を実現するためには、臨界密度 ( $n_c$ ) 以下では光速で伝搬する航跡場の位相速度、すなわちレーザーの伝搬(群)速度を抑えればよい。そのためには固体密度より1桁低く、ガスターゲットより1桁高い中間密度のターゲット(電子密度:  $n_e \sim 10\text{--}20 n_c$ )を用いる必要がある。我々は泡状構造を持つフォームターゲット[6](図1)に着目した。本研究では、フォーム(中間密度)ターゲットを用いたプロトンの航跡場加速の初実証を第一の目的とする。

一方で、中間密度を用いた航跡場加速では最高エネルギーは高々100MeV 超程度にとどまる。そこで本研究では、時間差をもつ2つのパルスを用いて、さらに高エネルギー(相対論的エネルギー $\sim$ GeV)のプロトンを生成することを長期的な目的としている[7]。本手法は多段階加速で、1つ目のパルスと固体密度ターゲットとの相互作用により、ある程度高いエネルギーをもつ種プロトンを生成し、2つ目のパルスによって臨界密度プラズマ中に航跡場を励起させ、種プロトンをさらに加速させる。数値シミュレーション(粒子計算)により、最大のレーザーエネルギーで GeV のエネルギーをもつプロトン生成が可能であることが示されている。

## 2. 方法

図2のように、銅基板にフォームターゲットを接着し、プラスチックのターゲットホルダーにマウントする。またフォーカスマニターをみて赤丸で示す表面上の不純物にフォーカスを合わせ、レーザーをターゲット表面に集光するようにアライメントを行う。イオンのエネルギーはシンチレータ及びトムソンパラボラにより計測した。また、ターゲットからの透過光をモニターする分光器をターゲット後方に配置した。

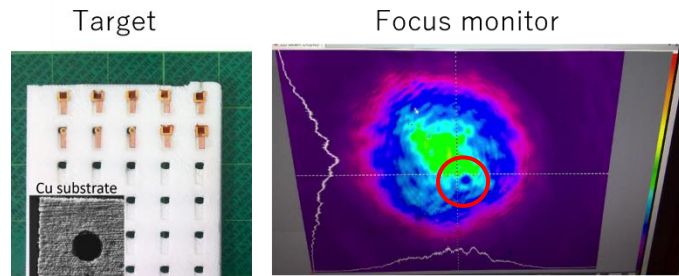


図2 ターゲットホルダーとフォーカスマニター。

## 3. 結果及び考察

### 実験結果

シンチレータを用いた飛行時間計測(図3)より、50 MeV/u 程度のエネルギーをもつイオンを確認した。また、別のショットのトムソンパラボラ計測により、5-6MeV 程度のプロトンと 10MeV 程度のカーボンイオンが生成されている事を確認した。

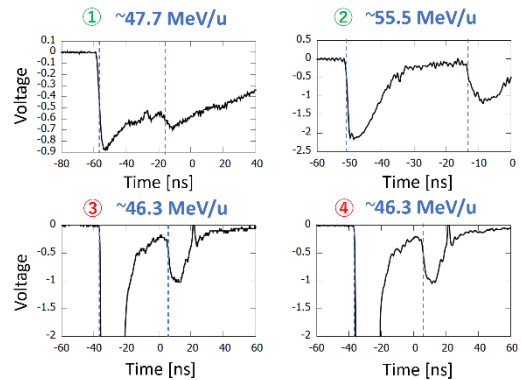


図3 シンチレータを用いた飛行時間計測。

### 数値計算結果(2D Particle-In-Cell)

実験で観測された50MeV/uのエネルギーをもつイオンの生成機構を特定するため、数値計算を行った。図5はターゲットの厚みを100 $\mu$ mで固定し、目安となるフォームの平均密度 ( $n_e \sim 5 n_c$ ) 付近でターゲットの密度を変化させた時の最大のプロトンエネルギーとカーボンエネルギーを示している。この図より、低密度側では  $n_e \leq 1n_c$  の領域でプロトンのエネルギーは50MeVを超え、高密度側では  $n_e \geq 12n_c$  の領域でプロトンのエネルギーは50MeVを超えている。それぞれの密度領域におけるプロトンの加速機構は異なる。図6はそれぞれの加速機構における最適な密度の時の各パラメータの分布を示したものである。低密度側では最大電場強度で10%-30%程度の透過光があるときにターゲット後面で磁気圧加速(Magnetic Vortex Acceleration)が働く。また、高密

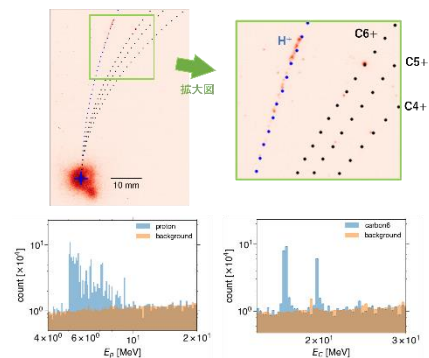


図4 トムソンパラボラ計測。

度側ではレーザーの伝搬速度が抑えられ、プロトンが航跡場にトラップされる。この時、レーザーはターゲット内で完全に吸収され、透過光はゼロとなる。磁気圧加速と航跡場加速どちらの場合も、50MeV/u を超えるエネルギーをもつカーボンの生成は一部の密度 ( $n_c \sim 0.1n_c$ ) を除いて困難であることがわかる。以上より、50MeV/u のエネルギーをもつプロトン生成を説明する加速機構は磁気圧加速と航跡場加速の2種類が考えられ、両者を区別するためには透過光の有無を確認すればよい事がわかる。

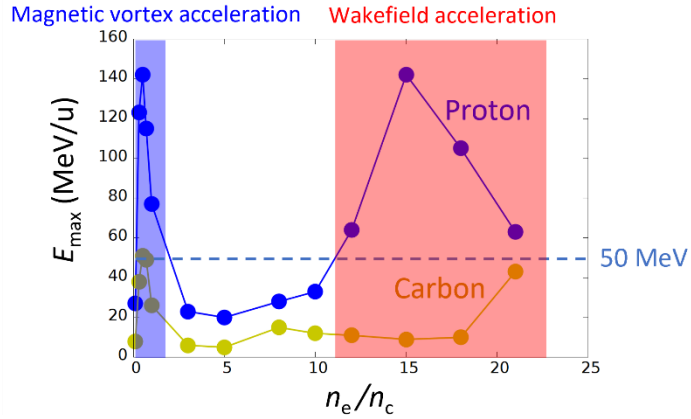


図5 ターゲットの厚みを  $100\mu\text{m}$  で固定し、密度を変化させたときのプロトンとカーボンの最大エネルギー。

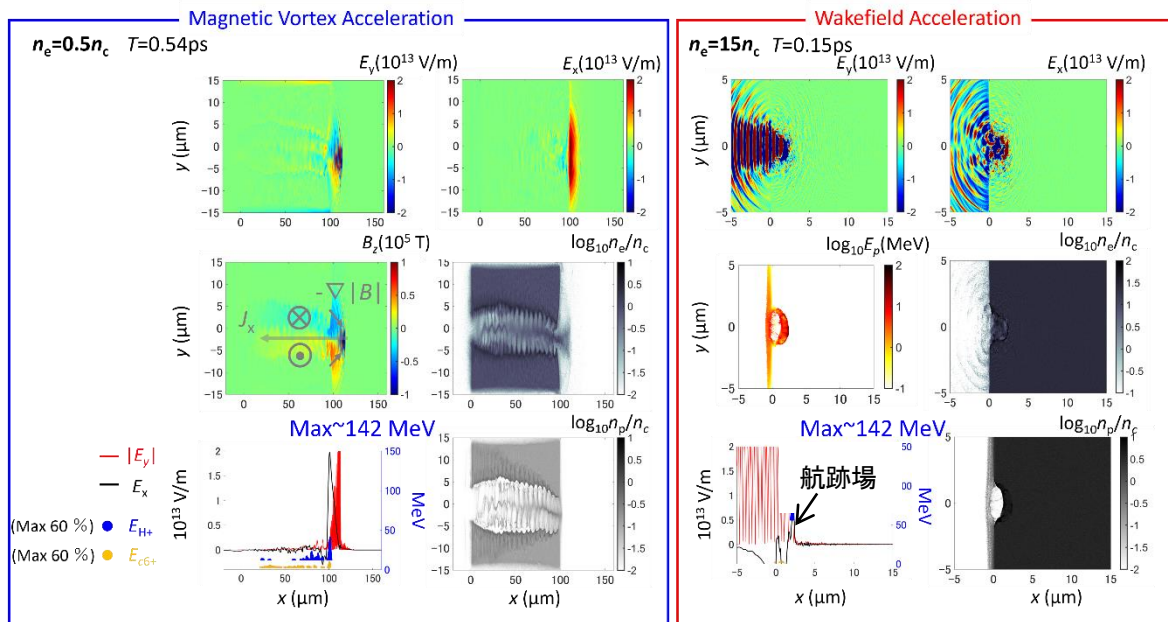


図6 (左) 密度  $n_c \sim 0.5n_c$  の時の  $t=0.54\text{ps}$  におけるレーザー電場  $E_y$ , 加速電場  $E_x$ , 自己生成磁場  $B_z$ , 電子密度  $n_e$ , プロトン密度  $n_p$  の2次元図及び  $y=0\mu\text{m}$  付近で平均をとった  $E_y, E_x$ , プロトンエネルギー ( $E_p$ ), カーボンエネルギー ( $E_{C6+}$ ) の一次元図. (右) 密度  $n_c \sim 15n_c$  の時の  $t=0.15\text{ps}$  におけるレーザー電場  $E_y$ , 加速電場  $E_x$ , プロトンエネルギー  $E_p$ , 電子密度  $n_e$ , プロトン密度  $n_p$  の2次元図及び  $y=0\mu\text{m}$  付近で平均をとった  $E_y, E_x$ , プロトンエネルギー ( $E_p$ ), カーボンエネルギー ( $E_{C6+}$ ) の一次元図.

透過光解析

図7に50MeV/u(図3)のイオン生成を観測したショットにおける透過光を示す。本ショットを含め、フォームターゲットではほぼすべてのショットで透過光がないことを確認した。

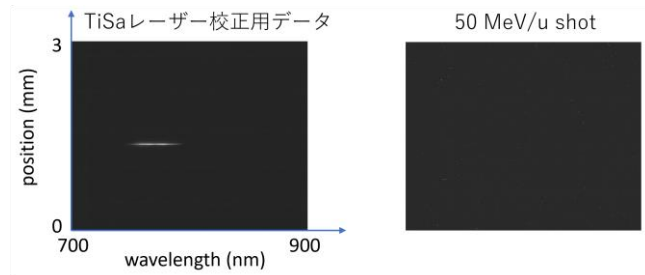


図7 透過光計測.

まとめ

以上より、シンチレータで観測した50MeV/uのイオンは航跡場で加速されたプロトンであると考えられる。今後の実験ではさらなる観測的証拠を集める予定である。トムソン散乱イメージングを用いて、ターゲット内のパルスの伝搬距離を調べる。また、レーザー強度を変えた時のプロトンエネルギーの依存性を調べる。将来的には時間差をもつ2つのパルスを用いて、さらに高エネルギー(相対論的エネルギー~GeV)のプロトンを生成する。

4. 引用(参照)文献等

- [1] T. Tajima *et al.*, Rev. Mod. Plasma Phys. **4**, 7 (2020)
- [2] M. Hoshino, ApJ. **672**, 940 (2008)
- [3] I. J. Kim *et al.*, Phys. Plasmas **23**, 070701 (2016)
- [4] A. Higginson *et al.*, Nat. Com. **9**, 724 (2018)
- [5] F. Wagner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 205002 (2016)
- [6] Y. Kaneyasu *et al.*, High Power Laser Science and Engineering **9**, e31 (2021)
- [7] S. Isayama *et al.*, Phys. Plasmas **28**, 073101 (2021)