

無衝突衝撃波による準単色イオン生成の物理機構解明

Investigation of physical mechanism for generation of quasi-monoenergetic ion acceleration by collisionless shock

坂和洋一¹⁾, 中川義治¹⁾, 泉智大¹⁾, 太田雅人¹⁾, 江頭俊輔¹⁾, Alessio Morace¹⁾, 南卓海¹⁾, 檜原崇正¹⁾, 境健太郎¹⁾, 西本貴博¹⁾, 高野晟輝¹⁾, 蔵満康浩¹⁾, 金崎真聡²⁾, 浅井孝文²⁾, 中川貴斗²⁾, 坂本溪太²⁾, 清水和輝²⁾, 神野智史³⁾, A. McIlvenny⁴⁾, O. McCusker⁴⁾, M. Borghesi⁴⁾, M. A. Alkhimova⁵⁾, T. Pikuz^{1,5)}, 近藤康太郎⁶⁾, A. S. Pirozhkov⁶⁾, 桐山博光⁶⁾, 福田祐仁⁶⁾
Y. Sakawa¹⁾, Y. Nakagawa¹⁾, T. Izumi¹⁾, M. Ota¹⁾, S. Egashira¹⁾, A. Morace¹⁾, T. Minami¹⁾, T. Hihara¹⁾, K. Sakai¹⁾, T. Nishimoto¹⁾, M. Takano¹⁾, Y. Kuramitsu¹⁾, M. Kanasaki²⁾, T. Asai²⁾, T. Nakagawa²⁾, K. Sakamoto²⁾, K. Shimizu²⁾, S. Jinno³⁾, A. McIlvenny⁴⁾, O. McCusker⁴⁾, M. Borghesi⁴⁾, M. A. Alkhimova⁵⁾, T. Pikuz^{1,5)}, Ko. Kondo⁶⁾, A. S. Pirozhkov⁶⁾, H. Kiriyaama⁶⁾, Y. Fukuda⁶⁾

¹⁾大阪大学, ²⁾神戸大学, ³⁾東京大学, ⁴⁾Queen's University Belfast, UK,

⁵⁾Russian Academy of Sciences, Russia, ⁶⁾量研

(概要)

宇宙から飛来する高エネルギー荷電粒子「宇宙線」の生成機構として、「無衝突衝撃波」による加速が最も有力な候補となっている。この無衝突衝撃波加速 (Collisionless Shock Acceleration : CSA) という宇宙物理学の知見から得られた新しい加速機構を、レーザーを用いて地上で実現し、最終的には「準単色 100 MeV 級プロトンビームの繰り返し生成」を実証し、その要素物理を明らかにする。

キーワード: 無衝突衝撃波加速, 準単色プロトンビーム生成

1. 目的

本研究では、「レーザー」、「宇宙物理 (無衝突衝撃波)」、「粒子加速」の物理・技術を「プラズマ」を介して融合することにより、レーザー駆動イオン加速の分野に「無衝突衝撃波加速 (Collisionless Shock Acceleration : CSA)」という加速原理を導入する。この従来型加速機構と全く異なるコンセプトによるオールオプティカルの加速法により、「準単色 100 MeV 級プロトンビームの繰り返し生成」を J-KAREN-P レーザーを用いて実証し、その要素物理を明らかにする事を最終的な目的としている。

2. 方法

レーザー光を臨界密度 (n_c) 程度のプラズマに入射すると、レーザーが効率よく電子を加熱するとともに、レーザーの光圧がピストンとしてプラズマを押し、密度分布の急峻化と大きな静電ポテンシャル形成が起こり、無衝突静電衝撃波 (Electrostatic Shock : ES) が生成される [1,2]。この ES の静電ポテンシャルが、速度 v_0 をもつ衝撃波上流イオンの運動エネルギーよりも大きければ、ES が「壁」として作用し、イオンが反射し加速される。ここで、衝撃波速度 v_{sh} が v_0 よりも十分大きければ、反射イオンの速度は $2 v_{sh}$ ($\gg v_0$) となり、準単色のイオンが得られる [1,2]。

実験では、J-KAREN-P レーザー (800 nm , $<5 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$, コントラスト $> 6 \times 10^{-12}$) を 2-クロロスチレン ($\text{C}_8\text{H}_7\text{Cl}$) 薄膜ターゲットに照射し、無衝突衝撃波生成・イオン加速を行った。レーザーの入射軸方向を水平面内の角度 $\theta = 0^\circ$ 、上下方向のあおり角 $\phi = 0^\circ$ とすると、ターゲットノーマル方向は $\theta = 30^\circ$ または 35° ($\phi = 0^\circ$) とした。レーザーの一部を 1 インチのミラーで取り出し、イオン化レーザーとしてメインレーザーの約 2.5 ns 前にターゲット裏面 (メインレーザー入射と反対方向、

$\theta = 0^\circ$) の上方 $\phi = 28^\circ$ から照射し、プレプラズマを生成した。イオン化レーザーはレンズで集光し、強度はメインレーザーの約 10^{-6} である。ターゲットの厚さ (1.0 - 2.0 μm) とイオン化レーザーの有無、メインレーザーのエネルギー (0.6 - 12 J)、スポット径 (直径 \sim 2, \sim 6 μm)、パルス幅 (40, 100, 200, 400 fs)、Positive chirp または Negative chirp (パルス幅 >100 fs の時) をパラメータとして実験を行った。

計測には、ターゲットの表面側から測定した可視分光器 (設置位置 $\phi = 0^\circ, \theta = -146^\circ$)、裏面側から測定したリアルタイム型トムソンパラボライオン spektrometa (TPIS) ($\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$)、Diamond detector time-of-flight イオン spektrometa ($\phi = 0^\circ, \theta \sim 30^\circ$)、電子 spektrometa ($\phi = 0^\circ, \theta \sim 35^\circ$)、X線分光器 (Focusing Spectrometer with Spatial Resolution : FSSR) ($\phi = 42^\circ, \theta = 36^\circ$) を用いた。FSSR は、Cl イオンの He β , Ly α と He-like satellite 線を含む 3.7 - 4.3 \AA の波長領域で計測を行った。

3. 結果及び考察

FSSR からは、イオン化レーザー有りの時に、無しの人に比べて He β 線強度の増加やターゲット厚さの増加に伴う He β 線スペクトル幅の増加、などが観測された。これらのスペクトルから、それぞれの実験パラメータにおける電子温度や密度を導出していく。TPIS で得られたイオンのエネルギースペクトルからは、プロトンに加え 4 価から 6 価までのカーボンイオンが検出された。パルス幅 >200 fs でイオン化レーザー無しの条件では、プロトンスペクトルに Maxwell 分布のバルクイオンに加えて高エネルギー成分が観測された。また、実験終了後、メインパルスの数 10 ps 前に 10^{-7} レベルのプレパルスが存在していたことが明らかになった。

今後、計測されたプレパルスとイオン化レーザーの強度を用いて流体シミュレーションを行い、メインパルス入射前のプラズマの電子温度や密度とその空間分布を導出する。さらに、このプラズマを初期条件としてメインパルスとの相互作用を 2 次元粒子コードによって計算し、レーザー条件やターゲット厚さの違いによって、どのような条件下で無衝突衝撃波が生成され、それによって加速されたプロトンおよびカーボンイオンがどのようなスペクトルを持つのか、などを求める。得られた結果を FSSR や TPIS から得られた実験データと比較・検討することによって無衝突衝撃波イオン加速の物理機構を明らかにする。

4. 引用(参照)文献等

- [1] D. Harberberger, et al., Nature Phys. **8**, 95-99 (2012).
- [2] R. Kumar, Y. Sakawa, et al., Phys. Rev. ACCEL. BEAMS **22**, 043401 (2019).