

軽ガスを用いた無衝突衝撃波の大型レーザー実験

#高橋 佳夏¹⁾, 松清 修一¹⁾, 諫山 翔伍¹⁾, 吉田 光太郎¹⁾, 凡 雨萌¹⁾, 忍田 昂太郎¹⁾, 中山 学¹⁾, 佐藤 弓真¹⁾, 藤山 倫太郎¹⁾, 河野 凌¹⁾, 森田 太智¹⁾, 山崎 了²⁾, 田中 周太²⁾, 竹崎 太智³⁾, 富田 健太郎⁴⁾, 境 健太郎⁵⁾, 蔵満 康浩⁶⁾, 佐野 孝好⁷⁾, 坂和 洋一⁷⁾

(¹⁾ 九大総理工, (²⁾ 青学大理工, (³⁾ 富山大, (⁴⁾ 北海道大, (⁵⁾ 核融合研, (⁶⁾ 阪大・工・電気, (⁷⁾ 阪大レーザー研

High-power laser experiment of collisionless shock generation using light gases

#Kana Takahashi¹⁾, Shuichi Matsukiyo¹⁾, Shogo Isayama¹⁾, Kotaro Yoshida¹⁾, Yumeng Fan¹⁾, Kotaro Oshida¹⁾, Gaku Nakayama¹⁾, Yuma Sato¹⁾, Rintaro Fujiyama¹⁾, Ryo Kono¹⁾, Taichi Morita¹⁾, Ryo Yamazaki²⁾, Shuta Tanaka²⁾, Taichi Takezaki³⁾, Kentaro Tomita⁴⁾, Kentaro Sakai⁵⁾, Yasuhiro Kuramitsu⁶⁾, Takayoshi Sano⁷⁾, Youichi Sakawa⁷⁾

(¹⁾ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, (²⁾ Faculty of Engineering Sciences, Aoyama Gakuin University, (³⁾ Toyama University, (⁴⁾ Hokkaido University, (⁵⁾ National Institute for Fusion Science, (⁶⁾ Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, (⁷⁾ Institute of Laser Engineering, Osaka University

Collisionless shocks in space, which act as energy converters, are considered strong candidates for cosmic ray accelerators. However, the detailed physical mechanisms of acceleration process remain unresolved, and extensive research has been conducted over the years using satellite observations and numerical simulations. To investigate particle acceleration through collisionless shocks, we have conducted high-power laser experiments aimed at reproducing a collisionless shock in the laboratory. In the experiment, a rarefied gas is filled in the chamber, and a solid target is irradiated with the Gekko XII laser (Institute of Laser Engineering, Osaka Univ.). The laser irradiation instantly ionizes the gas and target, creating a plasma. The target plasma compresses the gas plasma, generating a shock wave in the gas plasma. Additionally, by applying an external magnetic field to the test volume using Helmholtz-like coils, the plasma is magnetized.

Considering that particle acceleration through a collisionless shock takes a finite amount of time and that shock waves observed in space are well-developed, it is necessary to drive and measure a shock wave for extended period in experiment. While nitrogen gas was used in our previous experiments, this study employs light gases (hydrogen and helium) to extend the effective measurement time. Since suitable target materials for ionizing light gases have not been determined, silicon nitride, Teflon, and carbon are used for comparison as targets.

In the experiment conducted in 2023, shock wave propagation was confirmed with both hydrogen and helium gases. For hydrogen, it was necessary to increase the gas pressure to 16 Torr to capture a sufficiently clear shock wave structure visible through self-emission measurements. In this case, the Coulomb collision mean free path between ions was smaller than the cyclotron radius at the expected magnetic field strength, making it unsuitable for collisionless shock wave experiments. In contrast, with helium, shock waves could be generated at a gas pressure of 7 Torr, and it was confirmed that the mean free path was larger than the ion cyclotron radius for magnetic field strengths of 1 to 3 T. Therefore, helium was chosen as the optimal gas. Additionally, with helium gas, a precursor structure of the shock wave was observed for all targets, and it was confirmed that this structure originates from the target ions. Among the targets, silicon nitride required more time for the precursor to disappear and for the shock wave front to become clear compared to the other two targets. To capture a clear shock wave front as long as possible within the measurement field, silicon nitride is not suitable. No significant differences were observed between Teflon and carbon, so carbon was selected as the optimal target.

After the shock wave front was formed, periodic fluctuations of the wavefront, similar to the self-reformation characteristic of well-developed shock waves, were observed. In the experiments in 2024, the measurement field will be set farther from the target position compared to the last year, allowing for the measurement of shock wave propagation over a longer period. The presentation will include discussions based on the experimental data in 2024.

宇宙におけるエネルギー変換器としての役割を担う無衝突衝撃波は、宇宙線加速器の有力な候補である。しかし、加速の詳細な物理機構は未解明であり、人工衛星による観測や数値シミュレーションを用いて、長年にわたり研究が続けられている。我々は、無衝突衝撃波による粒子加速を実験室で再現することを目的に大型レーザー実験を行っている。

実験では、チャンパー内に希薄なガスを充填した状態で、固体ターゲットに激光 12 号レーザー (大阪大学レーザー科学研究所) を照射する。レーザー照射により、ガスとターゲットが瞬時にプラズマ化し、ターゲットプラズマがガスプラズマを圧縮することで衝撃波を生成する。また、ヘルムホルツコイルを用いて検査領域に外部磁場を印加することで、プラズマを磁化する。

無衝突衝撃波による粒子加速には有限の時間がかかること、また宇宙で観測される衝撃波は十分に発達した衝撃波であることを考慮すると、実験でも衝撃波を長時間駆動し、計測する必要がある。2022 年度までの実験では、ガスに窒素を使用していたが、本研究では、実効的計測時間を稼ぐため、軽ガス (水素、ヘリウム) を用いた実験を行う。軽ガスの電離に適したターゲット材質が未定なため、ターゲットとして窒化ケイ素、テフロン、炭素を用いて比較検討した。

2023 年度の実験では、水素ガス、ヘリウムガスの両方で衝撃波の伝搬を確認できた。水素では、自発光計測で視認で

きる程度にはっきりした衝撃波構造を捉えるためにはガス圧を 16 Torr まで上げる必要があった。この場合のイオン間のクーロン衝突平均自由行程は、想定している磁場強度でのサイクロトロン半径よりも小さいため、無衝突衝撃波実験には適さない。対してヘリウムでは、ガス圧 7 Torr で衝撃波を生成でき、1.3 T の磁場強度に対して平均自由行程がイオンサイクロトロン半径よりも大きくなることが確認されたため、ヘリウムを最適なガスとした。

またヘリウムガスの場合、全てのターゲットで precursor と呼ばれる衝撃波の前駆構造が確認され、これがターゲットイオン由来であることが分かった。窒化ケイ素は他の 2 つと比較して、precursor が消失して衝撃波面が明確になるまでに時間を要した。計測視野内にできるだけ長く明確な衝撃波面をおさめるためには、窒化ケイ素は適さない。テフロンと炭素では明確な違いはなかったため、炭素を最適なターゲットとした。

衝撃波面が形成された後、十分に発達した衝撃波に特徴的な現象であるリフォーメーションに類似した波面の周期的な変動を観測した。2024 年度の実験では、前年度よりも計測視野をターゲット位置から遠くに設置し、より長時間後の衝撃波面の伝搬を計測できるようにする。発表では、2024 年度の実験データを交えて議論する予定である。