

大型レーザー装置で実験室に宇宙プラズマ衝撃波を生成

－宇宙線の生成メカニズム解明に向け新たな研究手段を確立－

ポイント

- ① 高エネルギーの宇宙線や大振幅波動の生成源として期待されている宇宙プラズマ衝撃波の物理には未解明な点が多い。
- ② 従来、人工衛星による観測が唯一の実証研究の手段であったが、大型レーザーを用いた「レーザー宇宙物理学実験」で実験室にこれを生成。
- ③ 条件を能動的に制御でき、再現性も担保される実験が新たな研究ツールに加わることで、当該研究が大きく進展する可能性がある。

概要

宇宙空間を満たしているプラズマ^{*1} はさまざまな星や天体現象によって生成される超音速の流体です。宇宙プラズマ衝撃波は天体現象の膨大なエネルギーを変換するエネルギー変換器の役割を担うと考えられています。しかし、エネルギー変換のメカニズムは複雑で未解明です。

九州大学 松清修一准教授・森田太智助教・諫山翔伍助教、青山学院大学 山崎了教授・田中周太助教、富山大学 竹崎太智助教、北海道大学 富田健太郎准教授、大阪大学 坂和洋一准教授、蔵満康浩教授、佐野孝好助教らの研究グループは、衝撃波を実験室に生成し、その構造解明に取り組みました。実験は世界有数の出力を誇る大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号レーザーを用いて行われ、本研究成果は 2022 年 8 月 26 日（金）に米国科学誌 Physical Review E（オンライン）に掲載されました。

これまで、人工衛星による観測が宇宙プラズマ衝撃波の唯一の直接的な実証研究手段でしたが、実験では条件を能動的に制御でき、再現性も担保されます。これらは衛星観測にはない利点で、新たな研究ツールとして実験が加わることで、この分野の研究が大きく進展する可能性があります。

宇宙線と呼ばれる極めてエネルギーの高い荷電粒子は、宇宙プラズマ衝撃波で作られると考えられています。宇宙線は、人工衛星の故障や宇宙飛行士の被ばくの原因になることが知られているだけでなく、惑星の長期的な気候変動や生命進化にも影響を与える可能性が指摘されています。宇宙線が発見されたのはいまから 1 世紀以上も前ですが、これがどのようなメカニズムで作られるのかを矛盾なく説明する理論は未だに確立されていません。宇宙プラズマ衝撃波のエネルギー変換過程の理解が進めば、宇宙線生成の謎の解明に向けて大きく前進すると期待されます。

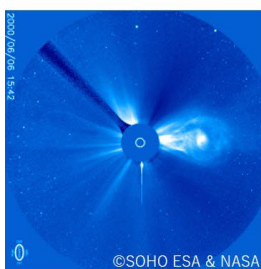


図 1. 太陽面爆発に伴って宇宙空間を伝搬する衝撃波
(ESA/NASA 提供)

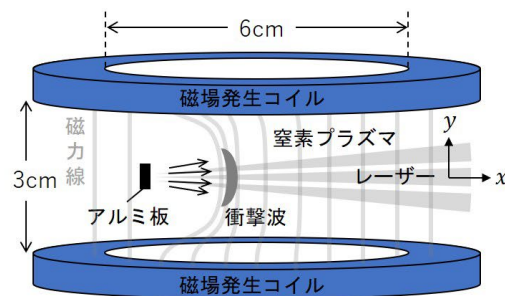


図 2. 実験概略図
アルミ板ターゲットにレーザーを照射してアルミプラズマの爆風を生成。これが一様に磁場のかかった周囲の窒素プラズマを圧縮して衝撃波が生成される。



図 3. 激光 XII 号レーザーレーザー照射時の実験チャンバー。アルミとレーザーの相互作用で生じた放射光をとらえている。この放射光が周囲の窒素ガスを瞬時にプラズマ化する。

【研究の背景と経緯】

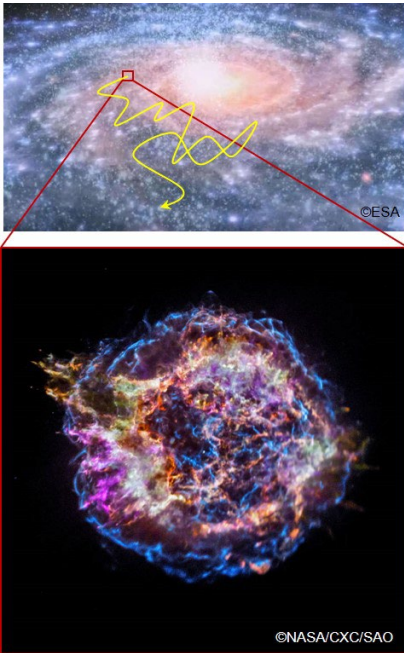


図4. 上：天の川銀河と宇宙線軌道（黄色線）の想像図
下：超新星残骸（Cas A）

高効率のエネルギー変換器の役割を担う宇宙プラズマ衝撃波は、宇宙のいたるところで観測されます。宇宙プラズマ衝撃波のエネルギー変換機構の解明は長年の未解決問題です。宇宙プラズマ衝撃波の具体的な役割のひとつに宇宙線の生成があります。宇宙線がなぜ観測されているようなエネルギー分布を示すのかという重要な問題も、100年以上もの間未解明のままです。その最大の理由は、宇宙プラズマ衝撃波の複雑な構造にあります。時間的、空間的な変動が激しく、また変動の様子が周囲の宇宙環境によって大きく異なることから、統一的な理解が進んでいません。

宇宙プラズマ衝撃波の構造解明に向けて、従来実証研究に用いられてきたのは人工衛星データです。衛星観測に比べると、実験は条件（パラメータ）の制御性や現象の再現性に優れています。また一般に、衛星観測では現象の時間変動と空間変動を分離することが難しいのですが、実験では比較的容易です。衝撃波の場合、さまざまな異なるスケールの時空間変動が混在することも観測を難しくしますが、実験ではマクロなスケールとミクロなスケールを同時に計測することが可能です。そのため実験が可能になれば、宇宙プラズマ衝撃波の研究が飛躍的に進展する可能性があります。

【研究の内容と成果】

本研究では、大型レーザー装置を用いた室内実験で宇宙プラズマ衝撃波の構造解明を目指しています。宇宙と同様の状況を再現するため、十分広い検査領域を確保して、装置内に一様な窒素ガス（5 Torr）を充填し、一様で強い磁場（約4 T）を印加します。この状態でターゲットのアルミ板にレーザー（2.8 kJ）を照射すると、プラズマ化したアルミの爆風が広がります。この爆風が、プラズマ化した周囲の窒素ガス（窒素プラズマ）を圧縮することで衝撃波が形成されます。概略を前項の図2に示しています。この衝撃波生成法は本研究グループ独自のもので、これまで提案されている衝撃波生成法に比べて、衝撃波のパラメータを精度よく測ることができる点で優れています。大阪大学の激光XII号レーザーを用いた一連の研究では、青山学院大学が主導する実験によって窒素プラズマが次第に圧縮されていく様子[参考文献1]に加えて、九州大学が主導する実験によって十分な圧縮が起これ衝撃波が形成されていく様子を初めてとらえることに成功しました。右図では、実験で捉えられた衝撃波の形成過程の様子が、ミクロ構造の特徴を含めて数値シミュレーションの結果と整合することを示しています。

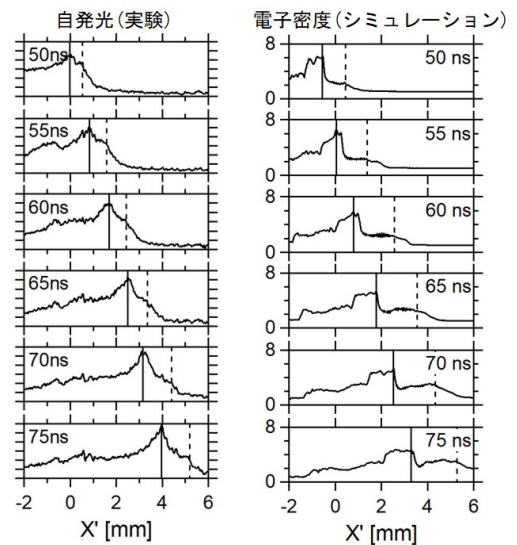


図5. 左：実験により、プラズマからの発光で捉えた衝撃波の形成過程。発光強度のピーク位置（縦実線）が時間とともに移動。ピークの前面（右側）にフット^{*2}が形成されており、その空間サイズが時間とともに変化している。
右：数値シミュレーションで得られた電子密度の時空間変化。電子密度のピーク位置の移動とフットの空間サイズの変化は実験同様。

【今後の展開】

宇宙で見られるような十分に発達した衝撃波を実験室に生成するため、今後はより広い検査領域を確保し、長時間にわたって衝撃波の伝搬を追跡することが重要になります。プラズマは電子とイオンから構成されているので、主に電子の運動が関係する構造と、イオンの特徴的な運動に起因する構造が現れると考えられています。研究グループではまず、イオンスケールの構造の解明に取り組む予定です。

宇宙線がなぜ観測されているようなエネルギー分布を示すのか、最終的な宇宙線の生成効率は何によって決まっているのか、それを理解するためには、衝撃波近傍で宇宙線の種となる粒子がどのくらい作られるのかを理解することがカギだとされています。今後はこの、種となる粒子の生成に関する衝撃波の構造の解明に向けて世界で研究が進むと考えられます。

【大型レーザー実験】

大型装置を使った実験には多くの大学院生・学部生が参加しています。九州大学、青山学院大学、大阪大学、富山大学、北海道大学の学生たちは、実験データの取得やデータ解析、物理的解釈の議論に参加し、実験前には実験装置のデザイン（図2の磁場発生コイルの形状の設計や計測装置の配置の決定など）も担当しました。

【用語解説】

(※1) プラズマ

物質を加熱することで得られる固体・液体・気体に次ぐ第4の物質状態。宇宙に存在する観測可能な物質の99%以上はプラズマと考えられている。また、レーザーを物質に照射することでもプラズマ状態が生成される。

(※2) フット

マッハ数の高い宇宙プラズマ衝撃波に特有の構造。衝撃波面で反射されたイオンの運動を反映して、衝撃波の直前に密度（や磁場）のやや高い領域が形成されると考えられている。

【謝辞】

本研究は、大阪大学レーザー科学研究所の大出力レーザー「激光 XII 号」を用いた成果であり、九州大学、青山学院大学、大阪大学、富山大学、北海道大学、東北大学、東京大学との共同研究として、住友財団環境研究助成（203099）、日本学術振興会 学術研究助成基金助成金/科学研究費補助金（JP18H01232, JP22H01251, JP17H18270, JP15H02154）、研究拠点形成事業 B アジア・アフリカ学術基盤形成型「アジアにおけるレーザー宇宙物理学国際研究教育拠点（JPJSCCB20190003）」、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q- LEAP）「光量子科学によるものづくり CPS 化拠点（JPMXS0118067246）」、および大阪大学レーザー科学研究所・共同利用研究などの支援のもと実施されました。

【論文情報】

掲載誌：Physical Review E

タイトル：High-power laser experiment on developing supercritical shock propagating in homogeneously magnetized plasma of ambient gas origin

著者名：S. Matsukiyo, R. Yamazaki, T. Morita, K. Tomita, Y. Kuramitsu, T. Sano, S. J. Tanaka, T. Takezaki, S. Isayama, T. Higuchi, H. Murakami, Y. Horie, N. Katsuki, R. Hatsuyama, M. Edamoto, H. Nishioka, M. Takagi, T. Kojima, S. Tomita, N. Ishizaka, S. Kakuchi, S. Sei, K. Sugiyama, K. Aihara, S. Kambayashi, M. Ota, S. Egashira, T. Izumi, T. Minami, Y. Nakagawa, K. Sakai, M. Iwamoto, N. Ozaki, Y. Sakawa

D O I : <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.025205>

[参考文献 1]

掲載誌：Physical Review E (2022 年 2 月 11 日掲載)

タイトル：High-power laser experiment forming a supercritical collisionless shock in a magnetized uniform plasma at rest

著者名：R. Yamazaki, S. Matsukiyo, T. Morita, S. J. Tanaka, T. Umeda, K. Aihara, M. Edamoto, S. Egashira, R. Hatsuyama, T. Higuchi, T. Hihara, Y. Horie, M. Hoshino, A. Ishii, N. Ishizaka, Y. Itadani, T. Izumi, S. Kambayashi, S. Kakuchi, N. Katsuki, R. Kawamura, Y. Kawamura, S. Kisaka, T. Kojima, A. Konuma, R. Kumar, T. Minami, I. Miyata, T. Moritaka, Y. Murakami, K. Nagashima, Y. Nakagawa, T. Nishimoto, Y. Nishioka, Y. Ohira, N. Ohnishi, M. Ota, N. Ozaki, T. Sano, K. Sakai, S. Sei, J. Shiota, Y. Shoji, K. Sugiyama, D. Suzuki, M. Takagi, H. Toda, S. Tomita, S. Tomiya, H. Yoneda, T. Takezaki, K. Tomita, Y. Kuramitsu, Y. Sakawa

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.025203>

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学大学院総合理工学研究院 准教授 松清修一（マツキヨシュウイチ）

TEL : 092-583-7667 FAX : 092-592-8447

Mail : matsukiy@esst.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学広報室

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp