

## 小特集 大型レーザー装置を用いた科学研究の新展開

# 2. 高出力レーザーを用いた実験室宇宙物理実験

坂和 洋一<sup>1)</sup>, 蔵満 康浩<sup>1)</sup>, 森田 太智<sup>2)</sup>, 高部 英明<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, <sup>2)</sup>大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

(原稿受付: 2010年9月1日)

宇宙からやってくる高エネルギーの粒子である宇宙線の生成には、無衝突衝撃波が重要な役割を果たしていると考えられている。我々は高出力レーザーによって無衝突衝撃波を生成しその物理的機構を明らかにするとともに、衝撃波による粒子加速機構の解明を最終的な目的として研究を行っている。本章では、激光GXII号HIPERレーザーを用いて行った、高速対向プラズマ流の相互作用による無衝突静電衝撃波生成実験を紹介する。

### Keywords:

collisionless shock, cosmic ray, particle acceleration, counter-streaming plasma flows, High-power laser, Gekko XII HIPER laser

### 2.1 はじめに

20世紀の初めに気球実験によって、当時地球の内部に源を有すると考えられていた放射線が、宇宙からやってくる高エネルギー粒子（宇宙線）であることが発見された。しかし、 $10^{20}$ eVに至る高エネルギー粒子の起源は、宇宙線の発見当時から現在に至るまで明らかになっていない。

その一方で、宇宙線の生成には従来から衝撃波が重要な役割をはたしていると考えられてきた。1970年代には科学衛星の観測結果から、太陽フレア現象で作られた惑星間空間衝撃波において高エネルギー粒子が生成されていることが示された[1]。また1990年代には我が国のX線天文衛星観測の結果、超新星爆発の残骸（超新星残骸：SNR）を伝搬する衝撃波によって残骸のエッジ近傍で $10^{14}$ eVもの高速電子が作られている証拠が得られた[2]。これらの衝撃波はすべて、粒子間の衝突の自由行程よりもはるかに短い領域で衝撃波面が形成される、無衝突衝撃波である。宇宙・天体プラズマ物理学における長年の未解決問題である高エネルギー粒子や宇宙線の加速・生成には無衝突衝撃波が深くかかわっていると考えられている。

無衝突衝撃波は、長年にわたって、理論・シミュレーション[3]、ダブルプラズマ装置[4]、Q-マシン[5]、光電離プラズマ[6]、3Jのレーザーによって生成されたLiDのクラスタープラズマ[7]、および高出力・高強度レーザーを用いた実験[8-13]等によって研究されてきた。短パルス(<1 ps)で高強度(> $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>)のレーザーによって生成されたカットオフ密度以下のプラズマ中における粒子加速はRef.[8-10]に示された。これらの結果は、レーザーとプラズマの相互作用によって生成された衝撃波によってイオンが加速されていることを示唆している。一方、比較的低い強度のレーザー(～ $10^{14}$ – $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>)を用いた実験結果はRef.[11-13]に示された。Bellらは外部磁場中に設置

したグラファイト球とレーザー生成高速プラズマ流の相互作用によって無衝突バウ衝撃波を生成した[11]。Woolseyらは、SNRの衝撃波を模擬して外部磁場を印可し、対向プラズマ流の無衝突相互作用の実験を行った[12]。磁場の有無で密度プロファイルに違いはあったものの、無衝突衝撃波は観測されなかった。Romagnaniらはレーザーアブレーションプラズマとレーザーで電離された低密度の雰囲気ガスプラズマとの相互作用による無衝突衝撃波の生成を示した[13]。Nilsonらは超高強度(> $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>)のレーザーによって生成された低密度ヘリウムプラズマ中において、高マッハ数の無衝突静電衝撃波(円筒状爆風波)を生成した[14]。

近年、particle-in-cell (PIC) シミュレーションによって、外部磁場なしでも高速対向プラズマ流の相互作用によって無衝突衝撃波が生成されることが示された[15-18]。加藤らは対向プラズマにおけるワイベル不安定性によって自己生成磁場が発生し、それによって無衝突衝撃波が生成されることを示した[15, 16]。さらに加藤らは、ワイベル不安定性による無衝突衝撃波が励起されるまでの初期段階では、静電無衝突衝撃波が生成されることを示した[17]。Sorasioらは、異なる温度と密度をもつ対向プラズマ流の相互作用によって高マッハ数( $M > 10$ )の無衝突の静電衝撃波が生成されることを示した[18]。

我々は、高出力レーザーを用いて無衝突衝撃波を生成しその物理的機構を明らかにするとともに、衝撃波によるイオン加速機構の解明を最終的な目的として研究を行っている。本章では、外部磁場なしで平行平板型 double-plane ターゲットを用いて高速の対向プラズマ流を生成し、無衝突静電衝撃波を生成することを目的として行った実験について紹介する[19]。さらに、無衝突衝撃波が生成された条件下で、プラズマジェットのコリメーションが観測された[19]。

2. Laboratory Astrophysics Experiment using High-Power Lasers

SAKAWA Youichi, KURAMITSU Yasuhiro, MORITA Taichi and TAKABE Hideaki

corresponding author's e-mail: sakawa@ile.osaka-u.ac.jp

### 2.2 実験方法

図1 (a)にターゲット照射配位を示す。4.5 mm 間隔のプラスチック(CH)製平行平板型 (double-plane) ターゲット (3 mm×3 mm, 厚さ 10 μm と 60 μm) の, 手前の厚さ 10 μm の CH 平板に高出力レーザーを照射し, 裏面プラズマを生成した。この1枚目のCHからの輻射またはプラズマ流によって2枚目 60 μm の CH 平板からアブレーションプラズマを生成することにより高速対向プラズマ流を生成し, その無衝突相互作用により無衝突衝撃波を生成した。

実験は, 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激光 GXII 号 HIPER レーザーの4ビーム (Nd:Glass レーザー, 波長: 351 nm (3ω), パルス幅: 500 ps, エネルギー ~120 J/beam×4ビーム, 総エネルギー<500 J, 強度<10<sup>15</sup> W/cm<sup>2</sup>) を用いて行った。HIPER レーザーは, 12本のレーザーが一方向に集められ, ターゲットに照射される。計測は, 図1 (b)に示すように, ターゲットに対して垂直方向からのプローブレザー (Nd:YAG レーザー, 波長: 532 nm (2ω), パルス幅: ~14 ns) と ICCD カメラを用いたシャドウ計測 (SG: shadowgraphy) と干渉計測 (IF: interferometer) による2次元密度測定, ストリークカメラを用いた干渉像の時間発展計測 (SI: streaked interferometer) を行った。また, 波長 450 nm の自発光計測によるプラズマ輝度温度の測定を, ICCD カメラ (GOI: gate optical imager) とストリークカメラ (SOP: streaked self-emission optical pyrometer.) を用いて行った。

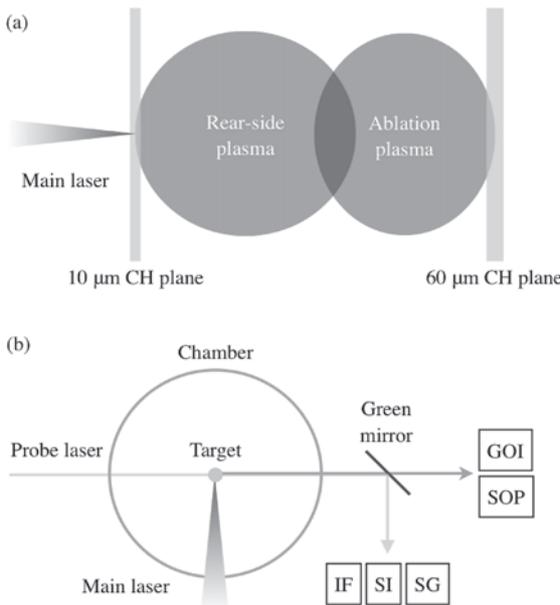


図1 (a) double-plane ターゲットの照射配位。2つのCH平板の間隔は4.5 mm。 (b) ターゲットに対して垂直方向からの光学計測配置図。プローブレザーを用いたシャドウ計測 (SG: shadowgraphy) と干渉計測 (IF: interferometer) の2次元密度測定, および, ストリークカメラを用いた干渉像の時間発展計測 (SI: streaked interferometer)。波長 450 nm の自発光計測によるプラズマ輝度温度の ICCD カメラ (GOI: gate optical imager) とストリークカメラ (SOP: streaked self-emission optical pyrometer) を用いた計測。

### 2.3 実験結果

図2に, SI計測 (図2 (a)) と SOP計測 (図2 (b)) の同一ショットでの結果を示す[19]。時間  $t=0$  はレーザー入射タイミングである。白色の破線で示したのは CH double-plane ターゲットの位置で,  $x=0$  にレーザーが照射される1枚目のCH, 4.5 mm に2枚目のCHが設置されている。2つのストリーク像は異なる特性を観測している。SI計測は約  $10^{18}-10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の電子密度を測定することができ, SOP計測の信号強度は, 光学的に薄いプラズマではプラズマ密度と温度に依存する。SI計測と同時に IF計測をしており, 同時刻の電子密度の2次元分布を求めている。

SI計測 (図2 (a)) より, 比較的低密度 ( $n_e \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) で高速 (~400 km/s) のプラズマ流が1枚目CHの後面に生成されているのがわかる (破線矢印1)。さらに同時に2枚目CHからもほぼ同じ速度 (~400 km/s) のアブレーションプラズマが1枚目CHを透過したレーザー光または輻射によって生成されており (破線矢印2), 高速の対向プラズマが生成されている。SOP計測 (図2 (b)) では1枚目CHから, SI計測よりも流速が遅く (~290 km/s) 密度の高い ( $n_e > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) プラズマ流を観測している (破線矢印3)。さらに同時に2枚目CHからもほぼ等しい流速・密度のアブレーションプラズマ流が生成されている (破線矢印4)。

図2 (a)に示した高速・低密度の対向プラズマ流は約 6 ns で出会っている。この2つのプラズマ流の相対速度  $\langle v_i \rangle \sim 800 \text{ km/s}$  と  $n_e \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  を用いて Spitzer の公式  $\lambda_{ii} = 2\pi\epsilon_0^2 m_i^2 \langle v_i \rangle^4 / (n_i Z^4 e^4 \ln \Lambda)$  よりイオン-イオン衝突平均自

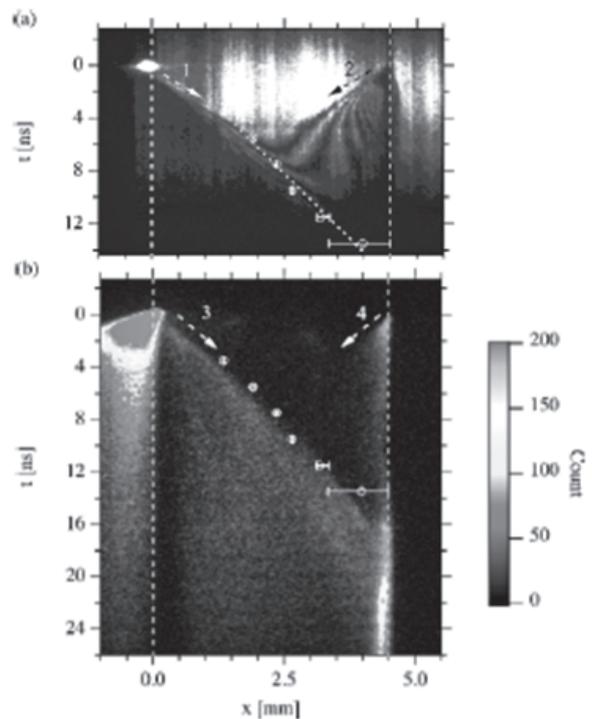


図2 (a) SI計測と (b) SOP計測の同一ショットでの結果。時間  $t=0$  はレーザー入射タイミング。白色の破線で示したのは CH double-plane ターゲットの位置で,  $x=0$  にレーザーが照射される1枚目のCH, 4.5 mm に2枚目のCHが設置されている。

由行程  $\lambda_{ii}$  を求めた[20]. ここで,  $\epsilon_0$  は真空中の誘電率,  $m_i$  はイオン質量,  $\langle v_i \rangle$  は平均イオン速度,  $Z_e$  はイオン電荷量,  $n_i = n_e/Z$  はイオン密度,  $\ln \Lambda = \ln(\lambda_D 4\pi\epsilon_0 m_i \langle v_i \rangle^2 / (Z^2 e^4))$ ,  $\lambda_D$  はデバイ長である. CH プラズマの平均  $Z = 3.5$ , イオン質量数  $A = 6.5$ , 電子温度  $T_e = 10 - 100$  eV を用いると,  $\lambda_{ii} = 70 - 77$  mm となり, システムの長さである 2 枚の CH 間の距離 4.5 mm と比べて十分に大きな値であることから, 約 6 ns での相互作用は無衝突相互作用である.

図 2 (b) に示した SOP 計測より, 1 枚目の CH プラズマからの自発光強度の  $x$  方向分布を求め,  $a + b \tanh(-(x - x_s)/W)$  の関数でカーブフィットすることによって, 発光強度の遷移幅  $W$  の時間変化を導出した(図 3). 遷移幅  $W$  は, レーザー照射後広がっていくが, 対向プラズマ流が出会う約 10 ns から次第に狭くなっている. 1 枚の CH のみの平板ターゲットでは遷移幅は時間とともに単調に増加しており, 対向プラズマ流の相互作用が遷移幅の急峻化に不可欠であることがわかる. また, 相対速度  $\langle v_i \rangle \sim 580$  km/s,  $n_e \sim 10^{19}$  cm $^{-3}$  の対向プラズマ流の  $\lambda_{ii}$  は  $T_e = 10 - 100$  eV に対して,  $\lambda_{ii} = 2.3 - 2.4$  mm であるのに対し, 13 ns における遷移幅が約 40  $\mu$ m であることから, 無衝突衝撃波が生成されたと考えられる. PIC シミュレーションによって求めた遷移幅との比較から, 観測された衝撃波は静電衝撃波であると考えられる[17].

図 4 に, メインレーザーからディレーを変えて計測したシャドウ計測 (SG) の時間発展を示す[19]. 影になっている部分が, プラズマ密度が高くプローブレーザーに対して不透明な領域である. 図 4 から, 同時に測定した SOP 計測のストリークカメラのスリットが設置された場所でのプラズマ先端に位置を求め, 図 2 (a) と 図 2 (b) の SI 計測と SOP 計測にそれぞれ白丸として示した. このプラズマ先端の速度は, 直線近似を行うと,  $246 \pm 17$  km/s となり (破線 SOP 計測で求めた破線矢印 3 ( $\sim 290$  km/s) に近い値を示

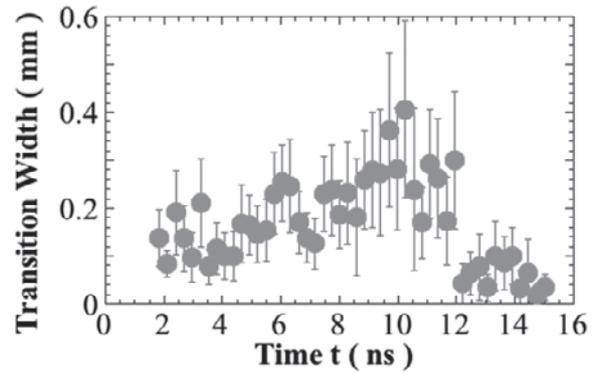


図 3 SOP 計測 (図 2 (b)) より, 1 枚目の CH プラズマからの自発光強度の  $x$  方向分布を求め,  $a + b \tanh(-(x - x_s)/W)$  の関数でカーブフィットすることによって求めた発光強度の遷移幅  $W$  の時間変化.

した.  $t = 3.5, 5.5, 7.5$  ns に示すように, 左側の 1 枚目 CH からの裏面プラズマは凸凹した形状をしている. 今回の実験では, メインレーザー 4 ビームがそれぞれ 100 - 250  $\mu$ m オフセットされており, オフセットのない照射条件ではプラズマは等方的に広がっていたことから, この不均一な構造はオフセットに起因するものと考えられる. 図 2 (b) と 図 4 に示すように, 高密度プラズマが出会い, 無衝突衝撃波が生成され始める  $t = 9.5$  ns 付近から, 裏面プラズマはコリメーションし始める. このコリメーション効果は時間とともに明確になっていき,  $t = 11.5, 13.5$  ns ではいくつかのフィラメント構造が観測され,  $t = 15.5$  ns では 1 つの幅が狭く密度の高いプラズマジェットが生成されている. 図 4 の右下に示したように, single-plane ターゲットではこのようなコリメートされたプラズマジェットは観測されず, double-plane ターゲット時にのみ観測されていることから, 対向プラズマ流が重要な役割を果たしている.

このようなジェットコリメーションの機構として, いく

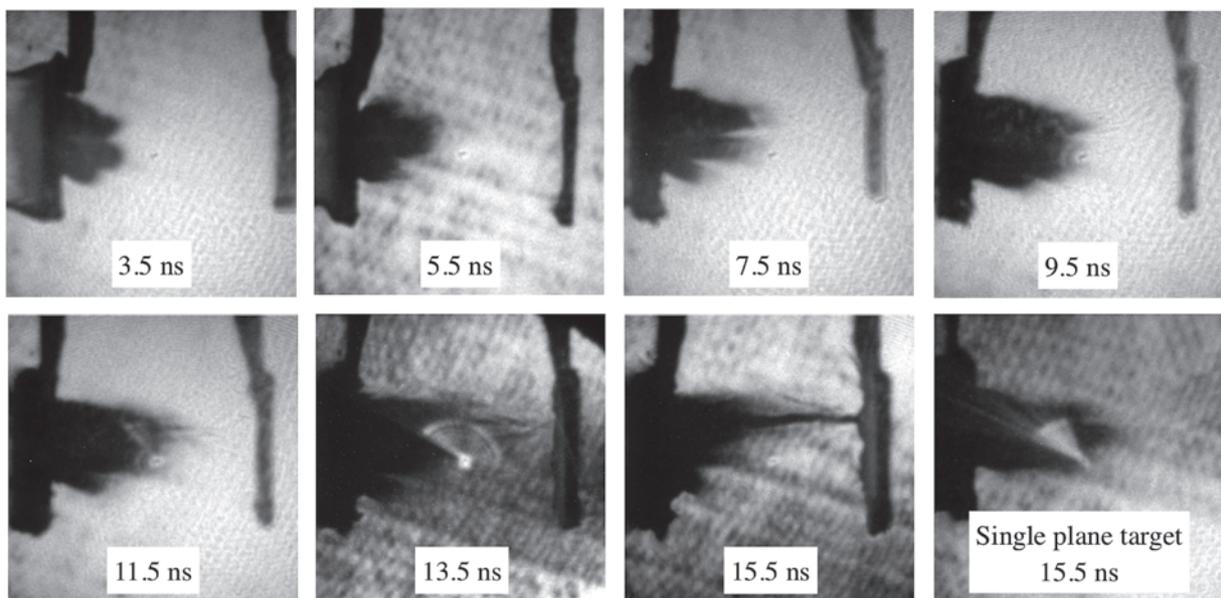


図 4 メインレーザーからディレーを変えて計測したシャドウ計測 (SG) の時間発展. 右下は single-plane ターゲットの結果.

つかの候補があげられる。1つ目は、衝撃波による影響である。図2と図3に示したように、1枚目のCHからの裏面プラズマの前面には無衝突衝撃波が生成されており、これがジェットコリメーションに関与している可能性がある。また、オフセットされたレーザービームによって $\nabla n_e \times \nabla T_e$ に起因する磁場が生成され[21]、さらにこの磁場が対向プラズマ中で励起されたワイベル不安定性によって合体またはリコネクションを起こしたとの可能性も考えられる[15]。

## 2.4 今後の展望

本章では、高強度レーザーを用いた静電衝撃波の生成とプラズマジェットのコリメーション実験結果について示した。今後の展望として、ワイベル不安定性によって生成された自己生成磁場中、および、外部磁場中の無衝突衝撃波の実験を計画している。加藤らは、高速対向プラズマ流の相互作用によってワイベル不安定性が励起され、不安定の線形成長、非線形構造形成、飽和を経て、イオン流体の運動エネルギー密度の2%程度の磁場エネルギー密度をもつ高磁場が生成されることを示した[15]。この磁場が衝撃波上流から流入するイオンの軌道を散乱し、これが実質的な異常粘性の働きをして衝撃波が形成され、強い衝撃波極限である3倍（3次元では4倍）の密度上昇が遷移領域（衝撃波面）を経て起っている[15]。シミュレーション結果からスケーリング則を求め実験室プラズマに適用した結果、CHプラズマで約1000 km/sの流速、 $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ の密度を実現できれば、数ns程度で無衝突衝撃波が形成されることが示唆された。我々はこのプラズマパラメータを実現するために、米国NIFレーザー[22]、OMEGAおよびOMEGA EPレーザー[23]を用いた実験を提案し、採択された。また、強磁場中の無衝突衝撃波生成実験も激光XII号およびOMEGAレーザーを用いて行う予定である。

## 2.5 まとめ

本章では、高出力レーザー激光GXII号HIPERレーザーによって生成された高速対向プラズマ流の相互作用による無衝突静電衝撃波の生成とジェットコリメーションの実験結果について示した。

## 謝辞

本章で紹介した研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B) (821340172)、分野間連携による国際拠点形成(H18-21年)(自然科学研究機構連携事業)、およびレーザーエネルギー学研究所共同利用・共同研究からの助成のもとで行われた。またこれらの成果は、日本、

英国、フランスの国際共同研究によって得られたものである。大阪大学の丹治浩樹、青木秀憲、井出亮夫、堂埜誠一、加藤恒彦、英国York大学のC. Gregory, J. Waugh, N. Woosley、フランスCEAのB. Loupiau, フランスLULIのA. Diziere, M. Koenig 諸氏に感謝します。

## 参考文献

- [1] F.B. McDonald *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **203**, L149 (1975); C.W. Barnes *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **210**, L91 (1976).
- [2] F.A. Aharonian *et al.*, *Nature* **432**, 75 (2004); Y. Uchiyama *et al.*, *Nature* **449**, 576 (2007).
- [3] D.A. Tidman, *Phys. Fluids* **10**, 547 (1967); D.W. Forslund *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **25**, 1699 (1970); P.H. Sakanaka *et al.*, *Phys. Fluids* **14**, 611 (1971); B. Lembege *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 2683 (1989); J. Denavit, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 3052 (1992); L.O. Silva *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 015002 (2004); M. Chen *et al.*, *Phys. Plasmas* **14**, 053102 (2007).
- [4] R.J. Taylor *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **24**, 206 (1970); H. Ikezi *et al.*, *Phys. Fluids*, **16**, 2167 (1973); H. Ikezi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **36**, 794 (1976); H. Bailung, Y. Nakamura and Y. Saitou, *Phys. Plasmas* **15**, 052311 (2008).
- [5] T. Takeuchi, S. Iizuka and N. Sato, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 77 (1998).
- [6] D.B. Cohn and K.R. MacKenzie, *Phys. Rev. Lett.* **28**, 656 (1972).
- [7] D.W. Koopman and D.A. Tidman, *Phys. Rev. Lett.* **18**, 533 (1967).
- [8] N. Izumi *et al.*, *Phys. Rev. E* **65**, 036413 (2002).
- [9] M.S. Wei *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 155003 (2004).
- [10] H. Habara *et al.*, *Phys. Rev. E* **70**, 046414 (2004).
- [11] A.R. Bell *et al.*, *Phys. Rev. A* **38**, 1363 (1988).
- [12] C. Courtois *et al.*, *Phys. Plasmas* **11**, 3386 (2004); N.C. Woolsey *et al.*, *Plasma Phys. Cont. Fusion* **46**, B397 (2004).
- [13] L. Romagnani *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 025004 (2008).
- [14] P.M. Nilson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 255001 (2009).
- [15] T.N. Kato and H. Takabe, *Astrophys. J. Lett.* **681**, L93 (2008).
- [16] H. Takabe *et al.*, *Plasma Phys. Cont. Fusion* **50**, 124057 (2008).
- [17] T.N. Kato and H. Takabe, *Phys. Plasmas* **17**, 032114 (2010).
- [18] G. Sorasio *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 045005 (2006).
- [19] Y. Kuramitsu *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **707**, L137 (2009).
- [20] L. Spitzer, *Physics of Fully Ionized Gases* (2nd ed.; New York: Interscience, 1962).
- [21] P.M. Nilson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 255001 (2007); P.M. Nilson *et al.*, *Phys. Plasmas* **15**, 092701 (2008).
- [22] <https://lasers.llnl.gov/>
- [23] <http://www.lle.rochester.edu/>