

極限的電磁波のトムソン散乱を用いた非平衡プラズマ診断

Non-equilibrium plasma diagnostics with Thomson scattering in an extreme electromagnetic field

境 健太郎¹⁾ 姫野 公輔¹⁾ 田中 周太²⁾ Tatiana PIKUZ¹⁾ 浅井 孝文³⁾ 安部 勇輝¹⁾
 南 卓海¹⁾ 田口 智也¹⁾ 小田 和昌¹⁾ 鈴木 蒼一郎¹⁾ 二階堂 颯佳¹⁾ 倉本 恭誓¹⁾
 安井 稔遥¹⁾ 酒井 優一¹⁾ 郡 英輝¹⁾ 金崎 真聡³⁾ 鍛冶 賢志¹¹⁾ 田邊 寛之¹¹⁾
 井上 千裕¹¹⁾ 望月 政一郎¹¹⁾ 尾崎 玲於奈¹¹⁾ 豊永 啓太¹¹⁾ 前川 馨¹¹⁾
 桐山 博光⁴⁾ 今 亮⁴⁾ 近藤 康太郎⁴⁾ Wei-Yen WOON⁵⁾ Che-Men CHU⁵⁾
 Kuan-Ting WU⁵⁾ Chun-Sung JAO⁶⁾ Yao-Li LIU⁶⁾ 諫山 翔伍⁷⁾ 時安 敦史⁸⁾
 Harihara Sudhan KUMAR⁸⁾ 富田 健太郎⁹⁾ 福田 祐仁⁴⁾ 蔵満 康浩¹⁾
 Kentaro SAKAI Kosuke HIMENO Shuta J. TANAKA Tatiana PIKUZ Yuki ABE Takumi MINAMI Tomoya TAGUCHI
 Kazumasa ODA Soichiro SUZUKI Fuka NIKAIIDO Kiyochika KURAMOTO Toshiharu YASUI Yuichi SAKAI
 Hideki KOHRI Masato KANASAKI Kenji KAJI Hiroyuki TANABE Chihiro INOUE Seiichiro MOCHIZUKI
 Reona OZAKI Keita TOYONAGA Hajime MAEKAWA Hiromitsu KIRIYAMA Kon AKIRA Kotaro KONDO
 Wei-Yen WOON Che-Men CHU Kuan-Ting WU Chun-Sung JAO Yao-Li LIU Shogo ISAYAMA Atsushi TOKIYASU
 Harihara Sudhan KUMAR Kentaro TOMITA Yuji FUKUDA Yasuhiro KURAMITSU

¹⁾大阪大学 ²⁾青山学院大学 ³⁾神戸大学 ⁴⁾量研 ⁵⁾National Central University
⁶⁾National Cheng Kung University ⁷⁾九州大学 ⁸⁾東北大学 ⁹⁾北海道大学

(概要)

高強度超短パルスレーザーが駆動する非平衡非定常プラズマ現象を解像するために、高強度レーザー自体の散乱光を用いた診断法の開発を行った。散乱光の空間分布をイメージング、波長スペクトルを空間分解分光計測でそれぞれ計測した。イメージング計測の結果は電子の空間分布に対応する輝度分布を示しており、高強度レーザーの光路上の密度分布を測れることを示した。一方、散乱スペクトルには波長方向に周期的な構造の存在を確認した。粒子シミュレーションと比較することにより、この構造が磁化プラズマ中の波動モードである Bernstein 波との共鳴スペクトルである可能性があることが分かった。これは磁場強度の診断に使用可能だと考えられる。今後はほかの手法で独立に磁場を計測することによって Bernstein 波共鳴のさらなる証拠をとらえることを目指す。

キーワード：非平衡プラズマ 高強度レーザー 散乱光

1. 目的

トムソン散乱とは光の電場により振動する電子がアンテナとしてはたらき、光を2次放出する現象である。プラズマ中では電子が collective にふるまうため、散乱光のスペクトルは特徴的なダブルピーク構造を示し、その形状を解析することで電子とイオンの温度、密度、速度等の局所的なパラメーターを求めることができる [1]。単色の電磁波による散乱スペクトルの形状は Dynamic structure factor で記述されるが [1,2]、これは密度揺動の時空間フーリエ変換で定義されるため、時間的にプラズマの状態が変化する系での散乱スペクトルは一般に知られていない。一方で、宇宙では無衝突衝撃波や磁気リコネクションのような高エネルギー現象において、非平衡プラズマが普遍的に存在している。それらを模擬する高出力レーザー実験が行われているが [3]、現状ではそのような非平衡プラズマからの散乱スペクトルの解析にも平衡を仮定した Dynamic structure factor が使用されている [4]。我々はこのような非平衡プラズマの一例として、運動論的に不安定なプラズマ

からの散乱スペクトルについて理論・シミュレーションを用いて研究してきた [5,6]。不安定性の成長が飽和するまでにかかる時間と比べて計測の積分時間が長い場合、散乱スペクトルの形状は不安定性が飽和した後の電子・イオンの分布関数で定義される **Dynamic structure factor** で説明できることが分かった。しかし、不安定性が成長している時刻のような、時間的に大きく分布関数が増加するプラズマに対する散乱スペクトルは未知の領域である。

運動論的な不安定性に限らず、非平衡プラズマからの散乱スペクトルを計測するためには、プラズマの状態が変化する時間スケール程度かそれ以下の時間分解能をもつ計測を行わなければならない。時間分解能は主に入射光のパルス幅で決まるため、フェムト秒程度のパルス幅を持った光源が必要になる。**J-KAREN** レーザー等のチャープパルス増幅法による高強度レーザーは、フェムト秒のパルス幅を持ちながら極限的な電磁場によって電子を瞬時に（フェムト秒で）相対論的な領域まで加速し、著しく Maxwell 分布からずれた分布関数を形成する。一方でイオンはその慣性により電子に追従できない。イオンの運動の時間スケールはピコ秒程度であり、加速された電子とイオンとの間に生じる **collective** な効果によりイオンの分布関数がピコ秒スケールで変化する、非平衡かつ非定常なプラズマを生成することが可能である。これによる散乱光を計測すれば、分布関数が増加している時間スケールでの散乱光について議論することができるようになる。

光と物質の相互作用を研究する高強度レーザー生成プラズマの実験では、常に駆動レーザー自体の散乱光が存在する。散乱光はレーザーとターゲットが相互作用している時刻の情報を持っているはずである。散乱光を用いたプラズマ診断として、2次元イメージを撮影することで密度の空間分布を測る例はあるが [7]、波長スペクトルからパラメータを推定することはほとんど行われていない。この領域を開拓していくのが本研究の最終目標である。

2. 方法

J-KAREN レーザーを冷却ガスジェットシステムにより生成した水素またはアルゴンのガス・クラスターターゲットに照射し、**J-KAREN** レーザー自体の散乱光を取得する実験を行った。図 1 に実験概念図を示す。レーザー軸から 135 度、水平面から 20 度の斜め下側に伝搬する散乱光をレンズで像転送し、**CCD** カメラで 2 次元イメージを計測した。また、ビームスプリッターを用いて一部の散乱光を空間分解可能な自作の分光器を用いて、波長スペクトルを取得した。分光器は複数設置し、角度分布を調べた。ショットごとにレーザー上流側で入射光の波長スペクトルを取得した。ガスジェットノズルの温度によりクラスターサイズを、プラズマミラーの有無でプレパルスレベルを制御し、イメージおよび波長スペクトルの変化を調べた。散乱スペクトルの形状と密接に関係する電子とイオンの分布関数を電子スペクトロメーター、トムソンパラボラ、固体飛跡検出器、シンチレーター等の粒子計測器を用いて取得した。

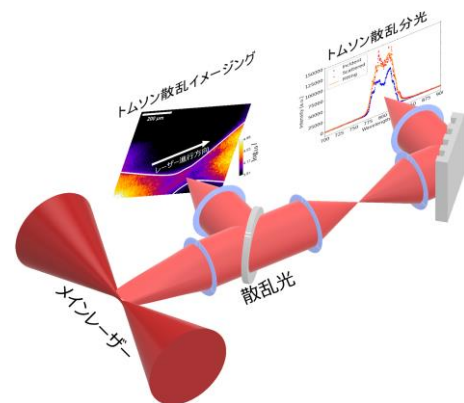


図 1 実験概念図。散乱光をビームスプリッターで分けてイメージング・分光を同時に行う。

3. 結果及び考察

イメージング計測の結果、レーザーが空間的に集光されていく様子に対応する輝度分布を確認した。ウォラストンプリズムを用いて光の偏光を調べると、計測した光がメインレーザーと同じ偏光を持つことから、この光が散乱光であることがわかる。レーザー集光位置付近の輝度が低い、散乱光の強度は入射したレーザーの強度と散乱体の密度に比例し、集光位置では強度が大きいため、集光位置における密度が低いことに対応する。この原因として、レーザーのプレパルスによってターゲットがメインパルスの到達前に破壊された可能性が考えられる。プラズマミラーを導入してプレパルスレベルを抑えたショットでは、レーザー集光点付近の輝度はプラズマミラーがない場合に比べて高くなることから、レーザーのプレパルスによってターゲットがメインパルスの到達前に破壊されること、およびプラズマミラーを導入することでそれを抑制できることがわかった (not shown)。

図 2(a) に水素クラスターターゲットを用いた実験の概念図を示す。黒、赤、青がそれぞれ小さいクラスター、大きいクラスターの中央、大きいクラスターの端からの散乱光に対応する。図 2(b) は実際のスペクトルを示し、色は図 2(a) の概念図に対応している。黒で示すスペクトルは周期的に波打つような形状を示している。これは赤と青で示すスペクトルに見られるエタロン効果による細かい構造 (約 3~4 nm の周期長) に比

べて有意に異なる周期長をもち、この長さはショット・位置ごとに異なる。例えば黒のスペクトルに周期的構造が見える波長域では青のスペクトルにも周期的構造が見えているが、青の方が長い周期長をもち、2次元イメージと比較することで、この周期的な構造は小さいクラスター状のプラズマ、もしくはガス状のプラズマからの散乱光によく見られることがわかった。結果を解釈するために、小さなクラスターの極限として均一な水素プラズマを初期に配置し、これに対してレーザーを伝播させる2次元の粒子シミュレーションを行った。その結果、電子がレーザーの ponderomotive 力で加速されることにより流れる電流でレーザー軸に巻き付くキロテラ級の強い準定常磁場が生成されることがわかった (not shown)。シミュレーションで求めた波長スペクトルは実験と同様に周期的な構造を示し、生成された磁場の強度と構造の周期が相関していることが分かった (not shown)。磁場がある場合にトムソン散乱のスペクトルは、ジャイロ運動に関連して、電子・イオンのジャイロ周波数を整数倍した周波数でピークを持つ周期構造が現れる。協同トムソン散乱の枠組みで考えると、これは磁化プラズマ中の静電波である Bernstein 波との共鳴スペクトルだと理解できる [8]。シミュレーションにより、波長スペクトルの周期長と自己生成磁場の電子ジャイロ周波数で決まる周期長が矛盾しないことから、計測された散乱光の波長スペクトルが Bernstein 波共鳴で説明できることが分かった。Bernstein 波共鳴スペクトルの周期長は磁場強度に比例するので、高強度レーザー実験における磁場強度の診断に使えると考えられる。今後はほかの手法で独立に磁場を計測することによって Bernstein 波共鳴のさらなる証拠をとらえることを目指す。

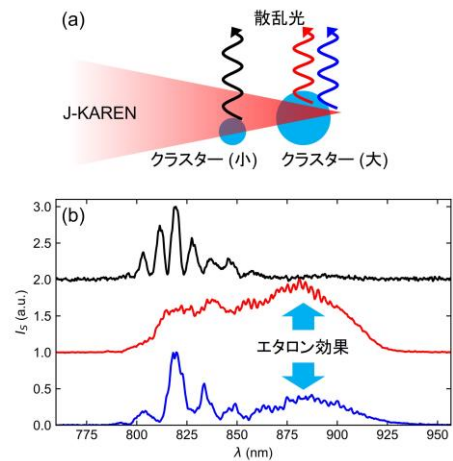


図 2 (a) 水素クラスターターゲットを用いた実験の概念図。(b) 異なる位置の散乱スペクトル。エタロン効果に対応する信号のほかに、ほぼ一定の周期長をもつ信号が存在する。

4. 引用(参照)文献等

- [1] D. H. Froula et al., “Plasma scattering of electromagnetic radiation: theory and measurement techniques,” Academic Press (2011).
- [2] S. Ichimaru, “Basic Principles of Plasma Physics,” Westview Press, (1973).
- [3] Y. Kuramitsu et al., Nat. Commun. 9, 5109 (2018).
- [4] F. Fiuza et al., Nat. Phys. 16, 916-920 (2020).
- [5] K. Sakai et al., Phys. Plasmas 27, 103104 (2020).
- [6] K. Sakai et al., Phys. Plasmas 30, 012105 (2023).
- [7] N. Nakanii et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 18, 021303 (2015).
- [8] S. B. Korsholm et al., Phys. Rev. Lett. 106, 165004 (2011).