

研究課題名: 超高強度レーザー生成プラズマの自己散乱の理解と非平衡プラズマ診断

1. 研究目的

2018 年にノーベル物理学賞を受賞した Chirp-pulse amplification 法の確立により、レーザーを時間・空間的に圧縮することでレーザーの集光強度は飛躍的に上昇した。超高強度レーザーを用いることで相対論的なプラズマ現象をレーザーのパルス幅程度 (~ 10 fs) で瞬時に生成することができ、がん治療や核融合点火を目指した粒子加速の研究や、直接観測できない遠方天体を模擬した高エネルギー宇宙物理の研究が行われてきている。これらの研究のためには時間的に激しく変動するプラズマの構造・分布関数等を時間分解して測る必要があるが、現象が高速であるため基本的には時間積分したデータしか取得できず、物理的解釈は数値シミュレーションに大きく依存しているのが現状である。

本研究では、超高強度レーザーがプラズマと相互作用する際に発生する散乱光に着目して、レーザーのパルス幅程度 (~ 10 fs) の時間分解能を持った高速プラズマ診断を実現する。本研究では超高強度レーザーを光散乱の入射光として扱うが、これはプラズマの状態を変えるほど強いいため非平衡プラズマを作り出し、またパルス幅が短いため原理的に広帯域のスペクトルを持つ。光散乱の従来の理論は非平衡プラズマ・広帯域スペクトルを持つ入射光に対応していないため、理論的にも整備されていない領域である。この領域を開拓することで、超高強度電磁場中の光散乱現象を理解し、今まで見えなかった超高強度レーザーとプラズマの相互作用の運動論的な描像を実験的に明らかにする。

プラズマにより散乱した光を計測するという観点では、散乱光の強度はレーザー強度と電子密度に比例し、スペクトルは電子・イオンの分布関数を反映する [D. H. Froula et al., (2011)]。つまり、散乱光の空間分布・スペクトルを計測することで電子密度分布と分布関数をそれぞれ計測できる可能性がある。これまで様々なプラズマに対して散乱光を計測することでプラズマ状態の診断が行われてきたが、超高強度レーザーの分野で活用された例は少ない。従来使われてきた散乱スペクトルの理論は単色の入射光・定常プラズマを仮定するとスペクトルが Dynamic structure factor で記述できるというもので、超高強度レーザーが作り出す広帯域のスペクトルを持つ入射光・プラズマ状態が時間的に急激に変化する非平衡系では活用できない [K. Sakai et al., Phys. Plasmas (2020), K. Sakai et al., Phys. Plasmas (2023)]。本研究では超高強度レーザー生成プラズマを用いて非平衡プラズマによる散乱スペクトルの理論を実験的に検証すると同時に、散乱スペクトルを用いて超高強度レーザー生成プラズマ状態の診断を行う。

2. 2024 年度の研究成果

2024 年度は QST 関西光量子科学研究所の内部利用の一環として J-KAREN-P レーザーを用いた実験を行った。内部利用として実験ができたのは、プラズマミラーというレーザー時間波形をクリーニングするためのシステムが導入され [A. Kon et al., High Power Laser Sci. Eng. (2022)]、そのシステムの動作確認に本研究が有効だと判断されたからである。散乱光の空間分布をイメージング計測し、計測器上の偏光を Wollaston プリズムで分離することで計測された信号が散乱光であることを確定させた。プラズマミラーの有無で結果を比較すると、レーザー集光位置における散乱光強度がプラズマミラーを用いることで上昇することがわかった。簡単なプラズマ分布のモデリング・粒子シミュレーションとの比較により、散乱光強度の低下はレーザーを照射する標的の密度低下によるものであることが明らかになった。つまり、プラズマミラーを用いてレーザ

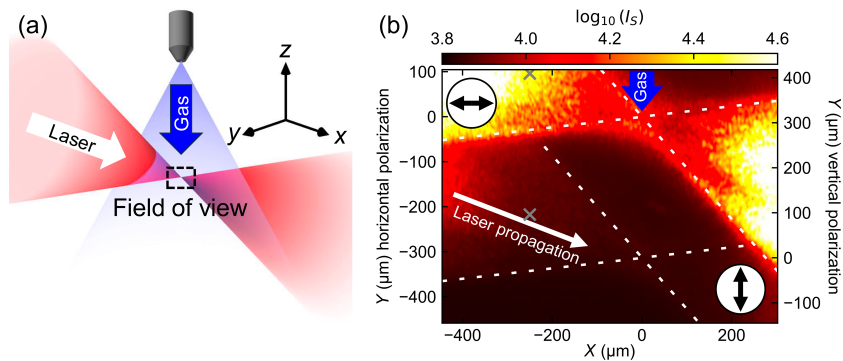


図 1: (a) 実験セットアップ。(b) 偏光イメージング計測結果 [成果 2]。

はレーザーを照射する標的の密度低下によるものであることが明らかになった。つまり、プラズマミラーを用いてレーザ

一の時間波形をクリーニングすることで、メインパルスの到達時にターゲットが保持されることを明らかにした。以上の結果をもとに、当初の計画通り散乱光イメージングによるプラズマ密度診断についての論文を投稿した [成果 2]。本成果は QST 関西光量子科学研究所内でも評価されており、2024 年度の年次報告書に本成果についての記事を寄稿した。

3. 2025 年度以降の研究計画

2025 年度以降も引き続き散乱光のイメージング・分光計測による高速診断の研究を行う。偏光カメラを用いた偏光成分の空間分布計測、ストリークカメラを用いた時空間発展計測、イメージング分光器を用いた偏光分光計測の 3 種の計測手法で散乱光を計測していく。すでに 2025 年の 6 月にかけて J-KAREN-P レーザーのアップグレード後のコミッション実験が行われた。前年度の成果を評価され引き続き内部利用の一環として散乱光を計測する実験を行った。ここではストリークカメラを用いた散乱光の時空間発展計測、分光器を用いた分光計測を行い、どちらも奇妙なデータを取得している。データの解釈が非常に難しいが、分光データについてはある程度解釈ができそうであるため、論文化を急いでいる。実験データを先に出すことが結果のインパクトを低める可能性があるため、申請段階の予定にあった 2 年目に計測器開発の論文を投稿するということは延期し、先に実験データを論文化した後で計測器の論文を書くという戦略で論文化を行っていく。不足分の実験データに関しては、外部利用として J-KAREN-P レーザーのマシントimeに応募するほか、もし実験の機会が少なければ京都大学の T6 レーザーを用いた実験にシフトすることも検討する。

申請段階では 2025 年度はフランスで開催される国際会議 IFSA2025 に参加して研究発表をする予定であったが、同じ週に福岡で開催される AAPPs-DPP2025 に招待されることが決まったため、計画を変更した。2025 年度は関連する研究も含め、3 件の招待講演依頼をすでに受けており、本研究成果は当該コミュニティで評価されていることがわかる。そのほか、外部資金に関しても複数件獲得しており、独立して研究を行っていくための環境を着々と構築している。

4. 研究成果等

論文

- [1] K. Sakai et al., High Energy Density Physics 52, 101132 (2024), 査読有
- [2] K. Sakai et al., Contributions to Plasma Physics, e70020 (2025), 査読有
- [3] Y. Kuramitsu et al., Physics of Plasmas 31, 053108 (2024), 査読有
- [4] F. Nikaido et al., Review of Scientific Instruments 95, 103302 (2024), 査読有
- [5] H. Ji et al., Physics of Plasmas 31, 102112 (2024), 査読有
- [6] Y. Sakawa et al., Physical Review Letters 133, 195102 (2024), 査読有
- [7] T. Minami et al., High Energy Density Physics 55, 101195 (2025), 査読有
- [8] A. Mizuta et al., Contributions to Plasma Physics, e70019 (2025), 査読有
- [9] T. Minami et al., Physics of Plasmas 32, 073108 (2025), 査読有
- [10] K. Kuramoto et al., Contributions to Plasma Physics, e70029 (2025), 査読有
- [11] 境健太郎, 蔵満康浩, プラズマ・核融合学会誌 100, 322-326 (2024), 査読無

学会発表

国際会議発表 11 件 (うち招待講演 6 件、口頭発表 2 件、ポスター発表 3 件)

国内会議発表 5 件 (うち招待講演 1 件、口頭発表 3 件、ポスター発表 1 件)

受賞

- [12] 近藤賞, 大阪大学

外部資金

- [13] 科学研究費補助金 (若手研究)、代表
 - [14] 自然科学研究機構 Open Mix Lab 公募研究プログラム (若手支援型)、代表
 - [15] 公益財団法人 立松財団 一般研究助成、代表
 - [16] 科学研究費補助金 (基盤研究 A)、分担
- その他、現在申請中 3 件 (そのうち代表が 1 件)。