The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Ultrafast Diagnostics for Relativistic Laser-Plasma Interaction
Author(s)	太田, 雅人
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/87848
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（太田　雅人）	
論文題名	Ultrafast Diagnostics for Relativistic Laser-Plasma Interaction （相対論的レーザープラズマ相互作用の超高速計測）

論文内容の要旨

レーザープラズマ実験は、宇宙物理を理解する新たな手法となっている。レーザー生成プラズマを用いて、宇宙物理の素過程を実験室で研究することができる。特に申請者の研究グループでは宇宙線加速機構の有力候補である無衝突ワイベル衝撃波の研究を行っている。先行研究では、長パルス（ナノ秒）高出力レーザーを用いて無衝突ワイベル衝撃波に特有なフィラメント構造と衝撃波の上流と下流の電子温度と密度，および非熱的な電子エネルギースペクトルが計測された。しかし、長パルスレーザーは、イオン加速に十分なレーザー強度を有しておらず、宇宙線（主にイオン）加速の実験的検証における問題となっている。

上記の課題を解決するため、相対論的短パルス（サブピコ秒）高強度レーザーを無衝突ワイベル衝撃波実験に用いる。これに対する粒子シミュレーションの結果は、レーザープラズマ相互作用で生成された高速電子が、バルクプラズマ内部にリターンカレントを誘起することが示された。この対向電子流（高速電子とリターンカレント）がワイベル不安定性を励起し衝撃波を生成する。実際のプラズマダイナミクスを理解するには、サブピコ秒の超高速計測法を開発することが不可欠である。ワイベルフィラメント構造と時間分解された荷電粒子エネルギースペクトルを取得するために、Small-Angle X-ray Scattering（SAXS）とElectro-Optic（EO）サンプリング法を開発した。前者は小さな散乱角での回折であり、後者は電場の情報（電場強度と時間発展）を非線形結晶を介してレーザーパルスの偏光情報に変換する。X-ray Free-Electron Laser（XFEL）を用いたSAXS計測は、ナノメートル・フェムト秒の時空間分解能でワイベルフィラメントの成長を計測するうえで有望である。荷電粒子エネルギースペクトロメーターのセットアップにおいて、加速された荷電粒子の検出器にEOサンプリング法を適用することでサブピコ秒の分解能でエネルギースペクトルの時間発展を取得可能である。これらの超高速計測は用途が広く、相対論的レーザー実験を行うための計測プラットフォームになりうる。

申請者らはSACLA(日本のXFEL)を用いてSAXS計測を開発し、高強度短パルスレーザーとXFELを用いたポンププローブ実験を実施した。三次元的な構造を持つレーザー生成プラズマに対するSAXSの性能評価として、Weibelフィラメントを模擬したシリコンワイヤー集合体をターゲットとして用いた。高強度短パルスレーザーを照射することでワイヤーを電離し、膨張する柱状プラズマの時間発展を取得した。また、高強度の入射XFELビームを遮光するために計測機の前面に設置されるビームストップの代わりに、XFELビームプロファイルを選択的に減衰させる積層型金属フィルターシステムを開発した。これにより、Weibelフィラメントなどの微細な（ナノスケールの）プラズマ構造に関する情報を含む入射XFELビーム周辺のSAXS信号が取得可能となった。

申請者はエシェロンミラーを用いたシングルショットEOサンプリング法によって相対論的電子ビーム周囲の電場の時空間分布の計測に成功した。エシェロンミラーは階段状のミラー表面を持ち、入射したプローブパルスは反射後に段差に応じた遅延を伴って複数のビーム群に分割され、これらを空間的に分別することで時間測定が可能になる。この技術は、時間分解式荷電粒子エネルギースペクトロメーターへ応用が可能である。得られた電場時空間分布は、ビーム伝搬方向の電場収縮を示し、電磁ポテンシャルのローレンツ変換の実証に成功した。

これらの基礎研究によって、ワイベル衝撃波の生成過程を相対論的レーザーを用いた地上実験によって検証するためのナノスケール、サブピコ秒の計測手法の開発の目処がたった。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　太田雅人　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	中井　光男
	副 査	教授	松本　浩典
	副 査	教授	藤岡　慎介
	副 査	教授	細貝　知直
	副 査	准教授	坂和　洋一
	副 査	講師	有川　安信

論文審査の結果の要旨

本研究は、高エネルギー宇宙線の起源と考えられているワイベル衝撃波の生成とそれによる粒子加速をハイパワーのレーザーを用いた地上実験によって明らかにすることを目的として提案されている実験計画に不可欠な計測手法の開発研究である。

高エネルギー宇宙線の起源として、相対論的プラズマ流におけるワイベル不安定性によって誘起される磁場乱流による無衝突電磁衝撃波(ワイベル衝撃波)による統計的加速の可能性が提案されている。実験的には、相対論的プラズマ流によるワイベル不安定性成長の動的挙動を調べ、磁場乱流の誘起と衝撃波の生成にいたる過程の詳細な計測が期待される。近年開発が目覚ましい、超高強度短パルスレーザーを用いて、相対論的電子流を生成し、ワイベル衝撃波の生成並びにそれによる粒子加速現象を検証しようとする実験計画が進められている。実験では、空間的にはサブミクロンスケール、時間的にはサブピコ秒で変化するワイベル不安定性の空間構造と生成される高速の荷電粒子のエネルギースペクトルの時間発展を観測することが必要となる。そのため、申請者は、X 線自由電子レーザーを用いた小角度散乱（Small-Angle X-ray Scattering（SAXS））によってサブミクロンスケールの空間構造の時間発展を、Electro-Optic（EO）サンプリング法による電場の時空間構造計測によって荷電粒子のスペクトルの時間発展を計測するという独自の着想を得て、その原理実証に成功した。

本論文は、7 章より構成されている。第 1 章では研究の背景となるレーザー宇宙実験の現状が紹介され、本研究での開発課題が述べられている。

２章では、研究の理論的な基礎として、超高強度レーザーとプラズマの相対論的相互作用並びに無衝突衝撃波による粒子加速の原理が述べられている。

第 3 章では、開発対象となっている、SAXS 並びに Electro-Optic（EO）サンプリング法の原理が説明されている。

第 4 章では、X 自由電子レーザーSACLA において実施された実験が報告されている。ワイベル不安定性によるフィラメント構造と同程度の直径・間隔を持つ 3 次元構造体であるサブミクロン周期のシリコンワイヤー集合体に高強度短パルスレーザーを照射して膨張する柱状プラズマを生成し、その時間発展を SAXS によって取得した。新たに開発した積層型金属フィルターシステムを用いることによって、5 桁以上のダイナミックレンジを有する観測が可能となった。これにより、従来の計測では不可能であったゼロ次光および低次の散乱光から高次の散乱光に至る広範な空間モードを観測した。

第 5 章では、EO サンプリング法によって相対論的電子ビーム周囲の電場の時空間分布を計測する具体的な手法が述べられており、新たに考案されたエシェロン(階段状)ミラーによる多時刻同時計測の手法が解説されている。測定された電場の時空間分布より荷電粒子ビームの時空間分布を導出するためには、相対論的な荷電粒子による電場分布が電磁気学的に正しく算出されなければならない。

第 6 章では、相対論的電子ビームバンチによる電場の時空間分布を開発された EO サンプリング法によって観測することによって、期待通りのサブピコ秒の時間分解能が達成されていることが示される

とともに、Liénard–Wiechert Potential による電場計算の妥当性が直接的な観測によって示された。これは、電場のローレンツ収縮を直接的な電場計測によって示した初めての観測結果である。

７章はまとめであり、本研究での成果をもとに、これらの手法を相対論的レーザーを用いた地上実験に適用するための今後の課題と見通しが報告されている。

以上により、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める.