

2023 年度発展的研究計画スタート支援報告書

2024 年 7 月 18 日

可知化センシングユニット 太田雅人

研究課題名：「相対論的プラズマ電場を用いた量子物性の探索」

1. 研究の目的・意義

本研究課題の目的・意義は、未踏の超高強電場下における新規量子物性機構発現の検証である。以下、研究背景を述べる。

強相関電子系に、最適化された振幅と周波数を有する電場を印加する事で、電子の動きを止め、超伝導状態が室温においても実現されることが予言されている[1]。これは、光誘起相転移の一環であり、非平衡状態の物質系である。近年、強相関電子系における光誘起相転移研究が、理学(非平衡多体問題等)・工学(超高速光スイッチ等)の両面から、精力的に研究が行われてきた。一般に、光誘起相転移は、自由度(電子自由度、格子自由度等)が一つの系においては、エントロピーを増大させる方向に物質を変化させる。しかし、強相関電子系においては、いくつかの自由度が競合することにより、新たな秩序系を形成する。印加電場の強度と周波数の条件が合致すると、エネルギーバンドの反転が起こり、電子間斥力の引力への転換、それに伴う、超伝導化が予言されている[1]。図1に電場の強度・周波数領域において、先行研究と本研究を比較した。図中の赤破線よりも上の領域($E > 0.024 \Omega$)ではバンド反転が起こることが予想されている。しかし、この条件を満たす電場を実現することは困難を極め、実験的検証は未だ行われていない。

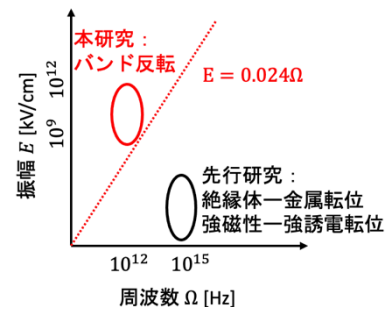


図1. 電場強度・周波数領域における物理現象の区分。

[1] N. Tsuji. PRL 106, 236401 (2011)

2. これまでの研究成果および今年度の進捗状況、今後の研究計画

■ これまでの研究成果

申請者は、相対論的プラズマ現象に関する実験的研究(レーザープラズマ実験、加速器実験)に長年従事してきた。ここで相対論的プラズマとは、高エネルギーな集団的荷電粒子(電子・イオン等)のフェムト秒領域における超高速現象である。そこで、申請者は、相対論的プラズマ現象の素過程を実験的に解明するべく、フェムト秒の時間分解能を有する超高速プラズマ計測を世界に先駆けて推進している。

申請者は、特殊相対性理論が予言する「電場の収縮」を可視化し、電磁気学における特殊相対性理論を世界で初めて直接実証することに成功した[2]。電場の収縮とは、等速直線運動を行う点電荷の周りの電場強度の分布が進行方向に対して収縮する現象のことを指す。申請者は、テラヘルツ物理学で開発されてきた電気光学検出とエシエロン式

シングルショット計測（図 2(a, b)）を組み合わせた手法を世界で初めて加速器実験に導入することで上述の成果（相対論的収縮電場の高精度な可視化（図 2(c, d)）を行ったが、本手法は相対論的プラズマ実験のプラットフォームになりうる。

[2] M. Ota et al., “Ultrafast visualization of an electric field under the Lorentz transformation”, Nature Physics 18, 1436-1440 (2022).

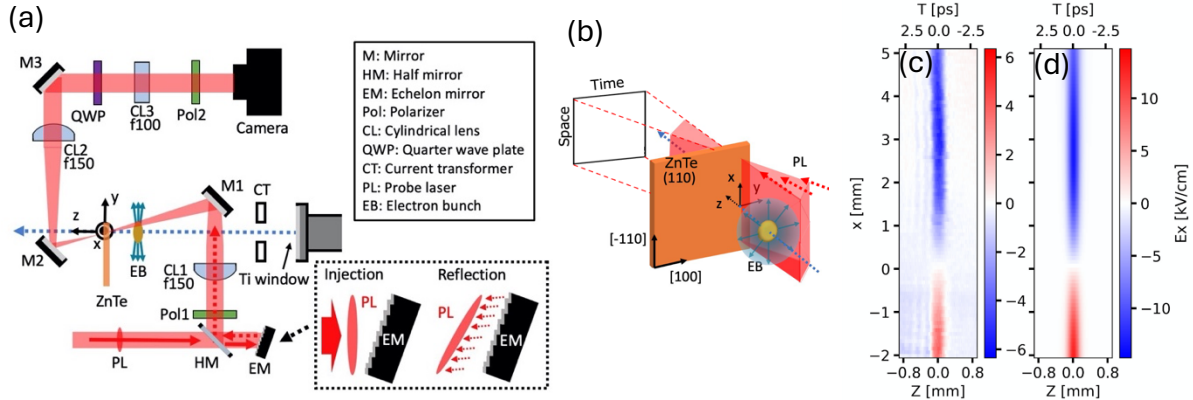


図 2. (a) エシェロン式シングルショット計測と電気光学計測を組み合わせた実験セットアップの全体像。計測対象は高エネルギー電子ビームの周りの相対論的収縮クーロン電場で、これはハーフサイクルのテラヘルツ電場とみなす事ができる。電子ビームは大阪大学産業科学研究所の電子ライナックによって生成された。(b) 電気光学結晶 (ZnTe 結晶) 付近の三次元的模式図。マルチパルスのプローブ光はシリンドリカルレンズで直線状に結晶面に集光され、時々刻々と結晶中をプローブ光が通過する状態を実現できる。結晶を通過した後のプローブ光の二次元プロファイルには、ZnTe 結晶に印加された電場の時空間分布が刻まれる。(c, d) 実験結果。理論計算結果。加速器で生成されたエネルギー 35 MeV、パルス幅 1 ps の電子ビームの周りの相対論的収縮クーロン電場の可視化。

■ 今年度の進捗状況

本申請研究では、上述の超高速電場計測と相対論的高強度レーザーを組み合わせ、新たな研究領域を創出する。超高強度テラヘルツ電場 (GV~TV/cm) を強相関電子系に印加することで、バンド反転に伴う超伝導化が理論的に予言されている。従来の超伝導は超低温におけるボース・アインシュタイン (BE) 凝縮による超伝導の発現であったが、本研究では外部電場によって強制的に電子の動きを強制的に止める (凍結させる) ことで BE 凝縮 (超伝導) を引き起こす点で大きく原理が異なり、室温における超伝導化が理論的には可能である。この超高強度テラヘルツ電場の生成は困難を極め、実験的な研究は皆無であった。しかし、レーザープラズマ研究における理論・数値計算からは、高強度レーザーと固体の相互作用で生じる電荷分離場は、このパラメータに合致することが予言されている。電荷分離場とは、相対論的 (レーザー強度 $> 10^{18}$ W/cm²) 高強度レーザーを固体 (金属、プラスチック) 薄膜に照射する事で生じる、プラズマシース中の超高強度電場の事である (図 3)。ただ、理論・数値計算では、多くの議論が行われてきているが、この電場のフェムト秒

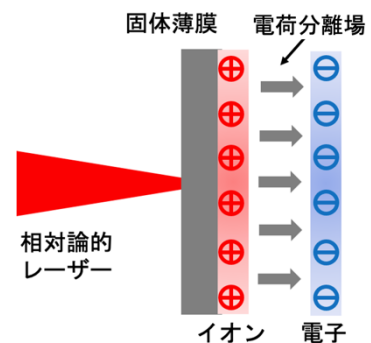


図 3. 電荷分離場模式図

領域での実験的計測は皆無である。そこで、高強度レーザーの超伝導研究への応用を目指し、レーザープラズマで生成される電荷分離場の超高速計測を実施する事が、本申請研究のファーストステップとなる。

そこで、今年度は研究計画の通り、固体と高強度レーザーの相互作用で生じる電磁場に対する、電気光学検出とエシエロン式シングルショット計測を組み合わせた超高速電場計測実験を実施した。実験は、京都大学化学研究所時田茂樹教授のグループからの協力を得て、本グループが所有する T6 レーザー (Ti:Sapphire レーザー、強度:10TW) を使用した。実験のセットアップとしては、図 2 (a) において、電子ビームを高強度レーザーパルスに置き換えたものとなる。現時点では、直接的に電荷分離場の計測はできない。ただ、予備実験として電気光学材料として先行研究と同じ ZnTe 結晶を使用し、ZnTe 結晶中に照射した高強度レーザーが非線形効果を介して生成するテラヘルツ電場と思われる信号が観測されている。一方で、ZnTe 結晶がプラズマ化する事で生じる自発光がバックグラウンドとして大きく生じる事も確認され、今後プラズマ自発光を抑制するために、プローブレーザーの波長に最適化したバンドパスフィルターの使用等を検討している。

■ 今後の研究計画

本申請研究で目指す、強相関電子系における室温超伝導は、シングルサイクル以上の超高強度テラヘルツ電場 (GV~TV/cm) [1]によって誘起されると考えられている。ここでは、その誘起光源として超短パルスレーザーと固体の相互作用で生じる相対論的プラズマ電場を想定した。しかし、実は、誘起光源としての候補がもう一つある。それは、加速器で生成された高エネルギー電子ビームの周りの相対論的収縮伝場によって実現されることが申請者の最近の研究から判明した。そこで、これらのレーザー実験と加速器実験を今後並行しながら行なっていく予定である。

本申請研究は、超高速電場計測を主体とする、プラズマ・物性研究となっているが、本研究を通して得られる知見は、核融合プラズマ (磁場閉じ込め核融合・レーザー慣性核融合) に応用可能である。本研究手法の核融合科学研究所の LHD (Large Helical Device) プラズマへの応用 (電場の揺動研究等) を目的とし、本研究所のいくつかの研究グループと共同研究を開始した。

3. 予算の使用状況

研究計画時の予算計画を大きく変更し、主に EKSPLA 社製 NL303HT-10 型 Nd:YAG レーザーの購入費用に使用した。本申請研究において加速器で生成された高エネルギー電子ビームが有効な研究手法である事が判明し、加速器施設にプローブ光用の Ti:Sapphire レーザーを導入する必要性が生じたためである。

4. 成果

4.1 共著を含む投稿論文、著書

- Igor Skobelev et al. “The Role of Collision Ionization of K-Shell Ions in Nonequilibrium Plasmas Produced by the Action of Super Strong, Ultrashort

PW-Class Laser Pulses on Micron-Scale Argon Clusters with Intensity up to 5×10^{21} W/cm²”, Photonics, 査読有 10, 1250, 1-11 (2023).

- K. Katagiri et al., “Transonic dislocation propagation in diamond”, Science, 査読有 382, 6666, 69-72 (2023).
- 太田雅人 et al., “電磁気における特殊相対性理論の直接検証”, レーザー研究, 査読無 第51巻8号 501-505 (2023).
- H. Kawaguchi et al., “Femtosecond vector vortex laser ablation in tungsten: chiral nano-micro texturing and structuring”, Opt. Mater. Express 14(2) 424-434 (2024).
- 太田雅人 et al., “電気光学検出を用いた相対論的クーロン電場の可視化”, J. Plasma Fusion Res. Vol.100, No.2 67-76 (2024).

4.2 国際・国内学会等での発表

- 国内学会招待公演: “電気光学検出を用いた相対論的収縮クーロン電場の超高速可視化”, M. Ota et al., Japan Congress on High Speed Imaging and Photonics (JCHSIP) 2023, (2023年12月).
- 国際学会招待公演: “Single-shot spatio-temporal measurement of relativistic electron beams by electro-optic sampling”, M. Ota et al., SPIE Photonics West 2024, (2024年1月).
- 国際学会招待公演: “Visualization of relativistic Coulomb fields by electro-optic sampling”, M. Ota et al., Matter in Extreme Conditions for Magnetized PLAsmas (MECMATPLA) 2024, (2024年2月).
- 国内学会招待公演: “電気光学検出を用いた相対論的収縮クーロン電場の研究”, M. Ota et al., 日本物理学会 2024年春季大会, (2024年3月).
- 国際学会 (ポスター): “Experimental study on properties of relativistic Coulomb fields” M. Ota et al., OPIC ALPS 2024, (2024年4月).
- 国際学会 (口頭): “Study on picosecond measurement of relativistic electron impact ionization inside solids” M. Ota et al., OPIC HEDS 2024, (2024年4月).

5 外部資金の応募状況、獲得状況、応募計画

官民(日本学術振興会、科学技術振興機構等)の研究助成金に申請を行い、7件の採択、5件の不採択、4件の審査中という状況にある。引き続き官民の研究助成金への申請を積極的に実施し、研究を遂行する。

6 受賞

1. 第17回大阪大学近藤賞 (2023年6月)
2. 2023 AAPPS-DPP U30 Scientist and Student Award (2023年11月)
3. 第18回日本物理学会若手奨励賞 (2024年3月)
4. レーザー学会業績賞・論文賞 (2025年1月)
5. 自然科学研究機構若手研究者賞 (2024年7月)