

相対論的収縮電場形成プロセスの観測

Observation of the generation process of relativistically contracted electric field

阪大レーザー研¹, 阪大産研², 関西大³, 三重大⁴ 太田雅人¹, 菅晃一², 王有為^{1,3}, Verdad C.

Agulto¹, Valynn Katrine Mag-usara¹, 有川安信¹, 浅川誠³, 坂和洋一¹, 松井龍之介⁴, 中嶋誠¹

ILE Osaka Univ.¹, ISIR/SANKEN Osaka Univ.², Kansai Univ.³, Mie Univ.⁴ Masato Ota¹, Koichi Kan², Youwei Wang^{1,3}, Verdad C. Agulto¹, Valynn Katrine Mag-usara¹, Yasunobu Arikawa¹, Makoto R. Asakawa¹, Youichi Sakawa¹, Tatsunosuke Matsui¹, and Makoto Nakajima¹

E-mail: ota.masato.ile@osaka-u.ac.jp

1. 研究背景

超高速荷電粒子周りに形成されるクーロン電場は、進行方向に収縮し、平面波を形成することが特殊相対性理論により予言されている。ここでは境界条件が考慮されていないが、境界条件が加わるとこの描像には変化が生じる。金属境界を抜け出て、自由空間を伝搬する超高速荷電粒子周りには、境界の通過点を中心とした球面状の電場が形成される。伝搬に伴い、球面波の曲率は小さくなり、無限遠では、上述した境界条件を考慮せずに導出された収縮平面電場に漸近する。

サブピコ秒の電子線パルスが生成するクーロン電場はテラヘルツ電場に相当する。相対論的電場の計測には、超高速な荷電粒子に付随するクーロン電場をサブピコ秒の高い時間分解能で計測する必要があり、100年以上もの間、相対論的電場の直接的な実証はされていなかった。

2. 実験セットアップ

大阪大学産業科学研究所の線形加速器を用いて生成された電子ビーム（エネルギー 35 MeV、パルス幅 ~ 1 ps、ビームサイズ 3.5 mm、電荷量 70 pC）周りに生成される電場分布を、電気光学検出により計測した（Fig.1参照）。ZnTe結晶前に任意の距離でアルミニウム箔を設置することで、これを金

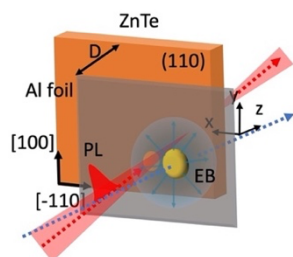


Fig. 1. Schematic of the experimental setup. A probe laser pulse and an electron beam are injected onto a ZnTe crystal. The probe laser passes through a hole on the Al foil while the electron beam hits a plane of the Al foil.

属境界条件とし、境界からの伝搬に伴う電場時空間分布発展を観測した。

3. 結果と考察

取得された実験結果とそれに対応する数値計算結果（Particle-in-cell simulation）をFig. 2の上下段にそれぞれ示す。左から順に伝搬距離Dが5, 15, 25, 209 mmと大きくなり、それに伴い球面電場の曲率が小さくなる様が確認できる。D = 209 mmの電場分布では、特殊相対性理論で予言された平面的な収縮電場に漸近することがわかる[1,2]。

4. 総括

電気光学検出を用いて高エネルギー電子ビーム周りに形成されるクーロン電場の超高速時空間分布を可視化し、金属境界通過後の電場波形の発展を観察した。長距離伝搬下では、球面電場は平面に漸近することを確かめた。本研究成果は、相対論的電場を可視化し、その境界条件下の性質を世界で初めて実証した。

References

- [1] M. Ota, *et al.*, Nat. Phys. **18**, 1436–1440 (2022).
- [2] M. Ota, *et al.*, Appl. Phys. Express **14**, 026503 (2021).

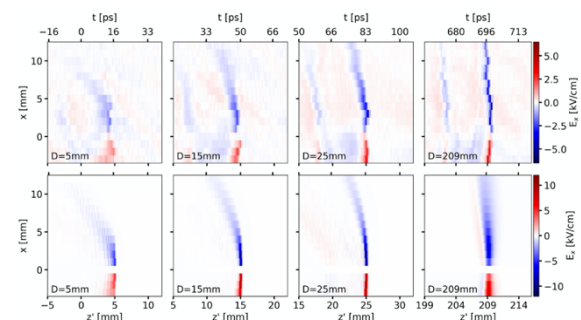


Fig. 2. Spatiotemporal evolution of the spherical wave front of the Coulomb field. (a-d) Experimental results. (e-f) Numerical simulation results. The central axis of the electron beam is located on $x = 0$ mm. The color bar denotes the electric field strength. The electric fields are directed to the beam axis.