

超高エネルギー電子ビーム放射機構の実験的研究

大阪大学 レーザー科学研究所 特任研究員 (助成時)

核融合科学研究所 助教 (現在)

太田 雅人

1. 研究背景 ～相対性理論とは～

1905年にアインシュタインによって発表された一本の論文(「運動物体の電気力学: 和訳」)は、人類の時空に対する概念を覆した。時間と空間は絶対的ではなく、観測者によって相対的に変化(伸縮)すると言うのだ。故に、この理論は相対性理論と呼ばれる。100年以上にもわたり、相対性理論に関する研究は精力的に行われ、多くの相対論的現象(時間の遅れ、静止質量、重力波、ブラックホール等)が実証され、一部は既に社会応用されている。この事に関して、「時間の遅れ」を例にとる。光に近い速度で運動する時計が、静止した時計よりもゆっくり進むのが「時間の遅れ」である。実証例としては、地球に高速で降り注ぐ素粒子の寿命が静止している時よりも長い事を確かめた事が挙げられる。実用例としてはGPSがあり、GPSが正常に動作するために、時間の遅れの効果を補正するようにプログラムされている。よって、相対性理論なしにはカーナビは正しく動作しない。

2. 研究課題 ～収縮電場の実験的検証～

上述した、相対性理論最初の論文のタイトル「運動物体の電気力学」が指す、相対論的電磁場を代表するのが、電場の収縮である。磁石の周りに砂鉄を振りまくと、不思議な模様が現れるが、これが可視化された磁場である。電場は磁石ではなく、電荷(電気の素)の周りに形成される。静止した電荷周りに形成される電場は等方的である。一方で、光に近い速度でこの電荷が運動を行うと、電場の分布は進行方向に対して収縮する。したがって、二次元における電場強度の等高線は円から楕円に変化する(図1参照)。相対性理論の教科書を覗くと、この収縮電場の模式図が見つかる。しかし、収縮電場の実験結果(写真)は見つからない。なぜならば、光に近い速度で移動する荷電粒子の周りに形成される収縮電場を可視化するためには、それに追従するだけの、高い時間分解能を有する電場計測が必要とされるからである。既存の電気回路を用いた電場計測では時間分解能は不十分であり、収縮電場の可視化と言うアインシュタインの宿題は一世紀以上にもわたって残され続けていたのである。そこで本研究では、電気光学検出と呼ばれる非線形光学を用いた超高速電場計測により、収縮電場の可視化を行った。

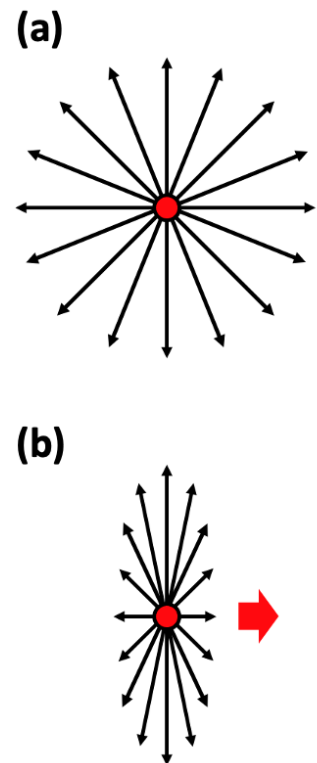


図1. 電場二次元分布
(a) 静止電荷 (b) 動電荷

3. 研究成果 ～収縮電場の可視化に成功～

実験は大阪大学産業科学研究所の線形電子加速器で生成された高エネルギー電子ビーム（速度：光の 99.99%、直径 3.5 mm で進行方向の長さ 0.22 mm の楕円球）を用いて実施された。電気光学検出によって計測された高速で自由空間を伝搬する電子ビーム周りに形成される電場の時空間分布を図 2 に示す。下横軸が進行方向におけるビーム中心からの相対的な距離（上横軸の時間に光速を乗じた）、縦軸がビームの同径方向の距離である。カラーバーは電場の強度を表す。電子ビームの中心軸は $x = 0$ mm に位置し、電子ビームは Z 正方向に伝搬する。 $Z = 0$ mm に縦方向に伸びる分布がクーロン電場であり、進行方向 Z に対して収縮している事が確認できる。これが高い時間分解能（サブピコ秒）で可視化された相対論的収縮電場である。実験結果は、理論式から計算される電場時空間分布と定量的に一致し、その妥当性が確かめられている。本研究成果は、アインシュタインが最初に提出した相対性理論に関する論文のタイトルにもなった現象を、一世紀越しに解決した成果として、高い評価を得ている [1]。

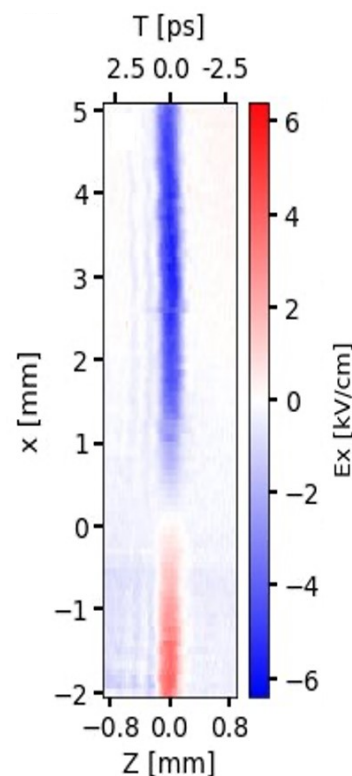


図 2. 電気光学検出で可視化された収縮電場

4. 総括

電気光学検出を用いた超高速電場時空間分布計測を、高エネルギー電子ビーム周りのクーロン電場に対して実施し、100 年以上前にアインシュタインによって予言された、電場の収縮を高い時間分解能で可視化する事に成功した。

5. 今後の展望

今回確立した、高エネルギー荷電粒子が形成する電場分布の超高速計測は、収縮電場以外の種々の相対論的電磁気現象を実験的に研究するためのプラットフォームになりうる。例えば、電子ビームの軌道上に新たに磁石を設置する事で、ローレンツ力によって軌道を曲げ、加速度運動をさせる事で生成されるシンクロトロン放射を観察する。シンクロトロン放射機構の詳細を解明することは理学としての価値はさることながら、本計測手法のシンクロトロン放射光施設における工学的な応用も期待される。

[1] M. Ota, et al. *Ultrafast visualization of an electric field under the Lorentz transformation*. Nat. Phys. **18**, 1436–1440 (2022).