

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料
〔事後評価用〕

平成15年度採択分

平成20年 3月31日現在

研究課題名（和文） 相対論工学による超高強度場科学への接近

研究課題名（英文） Toward Extreme Field Science via Relativistic Engineering

研究代表者

田島 俊樹 (TAJIMA TOSHIKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・関西光科学研究所・所長



研究の概要：

当研究において、我々は Einstein の発見した特殊相対性理論の示す重要な帰結の一つ“物質は光速を越えて進むことがない”、即ち、“物質流はエネルギーが高まると光速に向けて収斂する”という科学的原理を有効に使い、物質流の制御性を高めることで、「相対論工学」と呼ぶ意識的なエンジニアリングを展開し得ること、それにより従来の方法で到達出来ないとされていた極限状態の超高強度場を実現し得る可能性のあること、を指摘した。実際、我々は、電磁波の周波数青方遷移という相対論工学の基本概念的な原理を実証実験を行い、対向する2つの相対論的レーザー光の衝突に係る未踏の領域を開拓し、相対論工学の効果を世界で初めて観測した。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：高強度レーザー、相対論プラズマ、レーザー航跡場、光速飛翔鏡

1. 研究開始当初の背景

チャープパルス増幅法 (CPA) の発明により 90 年代に革命的に進展した小型の高強出力レーザーは、ペタワット ($PW=10^{15}$ W) レーザーを可能にするところまで来た。しかし、レーザー装置の大型化を目論まずに、更なる極限状態の極高強度場生成に接近し、未踏の物理を開拓するためには、新たな概念である「相対論工学」の手法の導入が必要であった。

2. 研究の目的

Einstein の発見した特殊相対性理論の示す重要な帰結の一つ“物質は光速を越えて進むことがない”、即ち“物質流はエネルギーが高まると光速に向けて収斂する”という科学的原理を有効に使い、物質流の制御性を高めることで、極高強度場を生成することの出来る一連のレーザー制御科学技術体系「相対論工学」の基本原則を実証する。

3. 研究の方法

当研究の技術的特徴は、装置自体の更なる大型化によるパラメータの飛躍を目論まず、レーザーの制御の新しい展開（相対論的コヒーレント制御）の導入により、レーザー制御技術に新しい地平を切り開き、「相対論工学」を打ち立てると言う点にある。このためには、「レーザー光波面の計測と制御」、および、「航跡場の計測と制御」の技術を確立するこ

とが最重要課題であり、プロジェクトの前半3年間の大部分はこれに当てられた。こうした相対論工学の研究を進める過程で蓄積されてきた諸技術は、結果的に、それそのものが高強度場科学の実験技術の粋と言える極めて高度なものとなった。

4. 研究の主な成果

電磁波の周波数青方遷移という相対論工学の基本概念的な原理を実証する実験を行い、相対論的レーザー光と相対論的レーザー光の衝突に係る未踏の領域を開拓し、

- ・“光速飛翔鏡”で反跳され周波数青方遷移されたシグナルの観測、
- ・透過レーザーの光子加速の確認、
- ・ポンプレーザーの赤方遷移、
- ・航跡場生成とそれによる（矢じり状や準単色構造の）電子加速の確認、
- ・航跡場生成に伴う他の相対論的コヒーレント構造体（ソリトン、バブル、「蛇皮」構造など）、

の発見と観察等々を行い、相対論工学の効果を実際に世界で初めて観測した。

この実証実験では、高強度・極短パルスレーザー光をアンダーデンスプラズマ中に集光し、集光点付近に発生する航跡場によって光速飛翔鏡を生成させた。電磁波 (=レーザー光) の周波数青方遷移は、光速飛翔鏡に対して 45° の角度で対向入射する別のレーザーパルスが、相対論的速度で進行する光速飛

〔4. 研究の主な成果（続き）〕

翔鏡によってその一部が反射されることによって起こる。このためには、共に相対論的な強度を持つ航跡場を生成するレーザーと航跡場に衝突するレーザーとを、マイクロ秒やフェムト秒の精度の4次元時空で精密に衝突させる必要がある。我々は、2つの強いレーザーを史上最小の4次元の極めて小さい体積で衝突させる技術を開発し、実際に、2つのレーザーをこの小体積内でぶつけることに成功した（図1）。

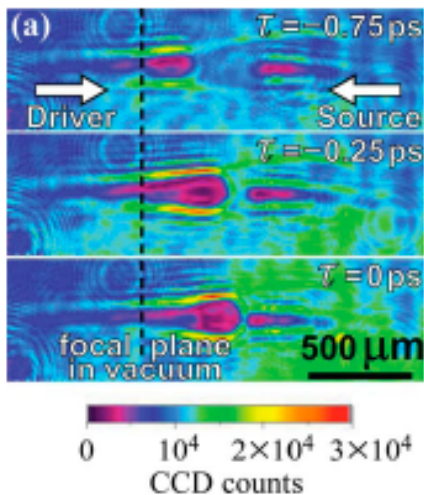


図1. 2つの対向するレーザーパルスが衝突する瞬間をとらえたシャドウグラフのスナップショット。
“Driver”は航跡場を作るレーザー、
“Source”は、反射されるレーザー。

既に、原子力機構のレーザーシステムを用いた準単色電子ビーム発生に関する実験とその理論的考察によって、レーザー光の自己位相変調の結果、波破壊に近い領域で非線形航跡場（密度場のカスプ状尖頭化）が生成することが既に明らかとなっていた。この実証実験では、これに近い実験条件で、光速飛翔鏡を発生させ、そこから反射される光の周波数青方遷移を計測することによって、光速飛翔鏡が機能していることの最初の証拠を得た。

また、相対論工学の一環として、新たな領域での光源を研究するため「相対論的電子とレーザーの反跳」に関する実験を行った。原子力機構関西研のマイクロトロン加速器で150 MeVまで加速された相対論的電子ビームと波長1064 nmのNd:YAGレーザーを対向させ生じる逆コンプトン散乱によるsub-MeV領域の偏光X線を発生した。逆コンプトン散乱によるX線は、指向性がよく、単色エネルギースペクトルが得られるので注目されており世界中の様々なグループによって実施が高まっているが、Sub-MeV領域の偏光X線ビ

ーム生成は初めてである。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

我々は、レーザーが生成する相対論的航跡場に対向するレーザーを照射することで、コヒーレントなアト秒のX線を発生できる方法の実験的検証を行った。これは、1905年にEinsteinが提唱した相対論的に飛ぶ鏡に反跳された光の予測についての検証でもある。こうした効果を駆使することで、将来、今まで到達できるとは思われていなかったような極限状態の物理領域に届くことが出来る。そして、更にはこうした物理の根本的基礎をなす相対論そのものの成り立ちやその検証（特殊相対論並びに一般相対論）が視野に入ってくる。

6. 主な発表論文

（研究代表者は太字、研究分担者には下線）

- (1) A.S. Pirozhkov, J. Ma, **M. Kando**, T.Zh. Esirkepov, Y. Fukuda, L.M. Chen, I. Daito, K. Ogura, T. Homma, Y. Hayashi, H. Kotaki, A. Sagisaka, M. Mori, J.K. Koga, T. Kawachi, H. Daido, S.V. Bulanov, T. Kimura, Y. Kato, **T. Tajima**, *Frequency multiplication of light back-reflected from a relativistic wake wave*, Phys. of Plasmas **14**, 123106-1~22 (2007).
- (2) M. Kando, Y. Fukuda, A.S. Pirozhkov, J. Ma, I. Daito, L.M. Chen, T.Zh. Esirkepov, K. Ogura, T. Homma, Y. Hayashi, H. Kotaki, A. Sagisaka, M. Mori, J.K. Koga, H. Daido, S.V. Bulanov, T. Kimura, Y. Kato, **T. Tajima**, *Demonstration of Laser-Frequency Upshift by Electron-Density Modulations in a Plasma Wakefield*, Phys. Rev. Lett. **99**, 135001-1~4 (2007).
- (3) G.A. Mourou, **T. Tajima**, S.V. Bulanov, *Optics in the Relativistic Regime*, Reviews of Modern Phys. **78**, 309~371 (2006).
- (4) M. Kando, S. Masuda, A. Zhidkov, A. Yamazaki, H. Kotaki, S. Kando, T. Homma, S. Kanazawa, K. Nakajima, Y. Hayashi, M. Mori, H. Kiriya, Y. Akahane, N. Inoue, H. Ueda, Y. Nakai, K. Tsuji, Y. Yamamoto, K. Yamakawa, J. Koga, T. Hosokai, M. Uesaka, **T. Tajima**, *Electron acceleration by a nonlinear wakefield generated by ultrashort (23-fs) high-peak-power laser pulses in plasma*, Phys. Rev. E **71**, 015403-1~4 (2005).
- (5) S. V. Bulanov, T. Esirkepov, **T. Tajima**, *Light intensification towards the Schwinger limit*. Phys. Rev. Lett. **91**, 085001-1~4 (2003).

ホームページ等

<http://wwwapr.kansai.jaea.go.jp/jaea/reefs/index.html>