

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13522

研究課題名(和文)ピコ秒高強度レーザーによる静的電磁場の自己生成とその相対論的電子加速への応用

研究課題名(英文) Probing ultrafast motion of critical surface pushed by multi-pico-second relativistic radiation pressure

研究代表者

小島 完興 (Kojima, Sadaoki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光量子科学研究部・研究員(任常)

研究者番号：40815156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：高強度レーザーをプラズマに照射すると電子やイオンが加速されます。このレーザー加速器は、従来の加速器よりも高いピーク強度を有するビームを生成できる点が注目され、世界中で研究されています。加速エネルギーの向上のために、レーザーの高強度化が競われていますが、その結果として装置への負荷が大きくなっています。我々はレーザーを長時間照射することで、レーザーの強度を上げずに装置負荷を低減しつつ、加速エネルギーが向上することを発見しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で用いたLFEXレーザーは、2018年にノーベル物理学賞を受賞したチャープパルス増幅法を利用し、地上で最も眩しい光を放射する実験装置の一つです。本研究ではこの高強度レーザーを物質に照射し続けることで、プラズマ中にキロ・テスラ3級の磁場を突発的に発生させ、レーザーによる電子加速の効率を4倍以上に増大させることに成功しました。本研究は、レーザー核融合エネルギーの実現に貢献すると共に、小型医療用粒子線加速器などへの応用も期待されます。

研究成果の概要(英文)：The dependence of the mean kinetic energy of laser-accelerated relativistic electrons (REs) on the laser intensity, so-called ponderomotive scaling, explains well the experimental results to date; however, this scaling is no longer applicable to multi-picosecond (multi-ps) laser experiments. Here, the production of REs was experimentally investigated via multi-ps relativistic laser-plasma-interaction (LPI). The lower slope temperature shows little dependence on the pulse duration and is close to the ponderomotive scaling value, while the higher slope temperature appears to be affected by the pulse duration. The higher slope temperature is far beyond the ponderomotive scaling value, which indicates super-ponderomotive REs (SP-REs). Simulation and experimental evidence are provided to indicate that the SP-REs are produced by LPI in an under-critical plasma, where a large quasi-static electromagnetic field grows rapidly after a threshold timing during multi-ps LPI.

研究分野：レーザープラズマ相互作用

キーワード：レーザープラズマ相互作用 高強度レーザー レーザーホールボーリング 光圧

## 1. 研究開始当初の背景

本研究で用いた高強度レーザーは、1 キロジュール(0.25 キロカロリー)のエネルギーを持つ光を、1 兆分の 1 秒(1 ピコ秒)の時間に圧縮し、特殊な鏡を使用して半径 100 分の 1 ミリメートルに集めることで、針の先ほどの小さな領域にギガバール<sup>28</sup>(約 10 億気圧)という高い圧力を持つ光の塊を作ります。このような高強度レーザー光は、物質を構成する原子から電子を容易に剥ぎ取り、物質をプラズマ化し、プラズマに含まれる電子を瞬時に光速まで加速します。

電磁波である高強度レーザー光が電子を加速する機構は、これまで 1 つの電子に対してレーザー電磁場が与える力を使って説明されてきました。この機構では初めに電子は電場成分により光の進む方向に対して垂直方向へと加速され、光速の近くまで速度を得ることで続いて磁場成分による力が発現し、光の進む方向へも加速されるというものであり、またこのメカニズムから導かれた理論式はこれまでの高強度レーザーの照射時間がフェムト秒台の実験で得られた結果と良く一致していました。

一方で近年、高強度レーザー光を用いた研究の更なる高度化を目指して、日本の LFEX(エルフェックス)を代表とした大エネルギー・大出力の大型レーザー装置が開発されました。これらの登場により、高強度レーザーの照射時間を従来の約 10 倍のピコ秒台まで延ばした実験が日本で先駆けて開始され、新たな領域における電子やイオンの加速機構の解明が進んでいます。関連研究には例えば、[A. Yogo et al., Scientific Reports 7, 42451 (2017)], [A. J. Kemp et al., Physical Review Letter 109, 195005 (2012)], [A. Sorokovikova, et al., Physical Review Letter 116, 155001 (2016)]などがあります。

## 2. 研究の目的

レーザーとプラズマの相互作用により得られる光速とほぼ等しい速度を有する電子は「相対論的電子」と呼ばれ、1990 年代から、様々な応用が検討されてきました。例えば、この相対論的電子のビームを使い、高密度物質を数千万度以上にまで加熱することが出来れば、人類の挑戦の 1 つである高速点火方式での制御核融合の点火を起こすことが可能になります(参考:日本物理学会物理 70 の不思議「核融合エネルギー発電は実用化するか?」)。また核融合プラズマのように、高温かつ高密度なプラズマは高エネルギー密度プラズマと呼ばれ、その特性は星の内部の特性と極めて近く、実験室で宇宙及び天体と関連する物理現象を研究する実験室宇宙物理や実験室天文学研究にも利用されています。今回用いた照射時間の長い高強度・長パルスのレーザー光は、レーザー装置への負荷を抑えつつ、より多くのエネルギーを運べるため、これら応用研究にとってメリットがあります。本研究成果を活用することでより多くの核融合エネルギーを取り出すもしくはより極限的な宇宙環境を再現することに繋がります。

また相対論的電子ビームが物質から飛び出すと、電子を追いかけるように物質からイオンが放出されることが知られています。放出されるイオンのエネルギーは、相対論的電子ビームのエネルギーと共に増大することが知られており、本研究成果はレ

レーザー加速イオンの高エネルギー化にも繋がります。レーザー加速イオンの応用として、がん治療用重イオン加速器が挙げられ、本研究成果を応用することで、現在、一部の都市に偏在しているがん治療用重イオン加速器の小型化に繋がれ、小型化した装置が各都道府県に配置される未来が訪れると期待されています。

### 3. 研究の方法

本研究で用いた LFEX レーザーは、2018 年にノーベル物理学賞を受賞したチャープパルス増幅法を利用し、地上で最も眩しい光を発射する実験装置の一つです。本研究ではこの高強度レーザーを物質に照射し続けることで、引き起こされる電子の加速機構を研究します。

### 4. 研究成果

本研究ではこの高強度レーザーを物質に照射し続けることで、プラズマ中にキロ・テスラ級の磁場を突発的に発生させ、レーザーによる電子加速の効率を 4 倍以上に増大させることに成功しました。発生したキロ・テスラ級の強磁場は地上最大級で、星表面の強度に匹敵します。

図 1(a)と(b)は突発性磁場の発生過程を示しています。突発性磁場は次の 4 つの段階を経て成長します。

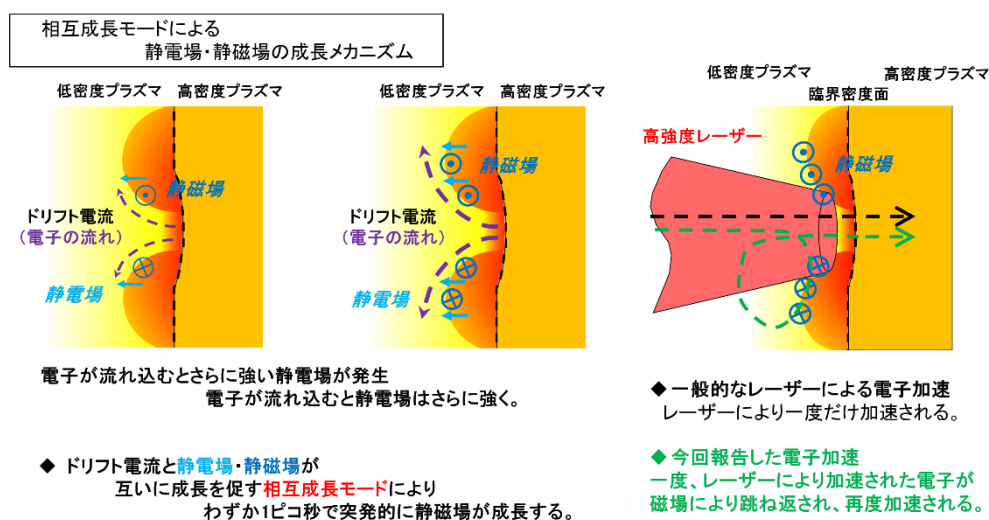


図 1 コンピュータ・シミュレーションにより明らかにされた相互成長モードによる静電場・静磁場の発生と電子加速のメカニズム

- 1、レーザーにより高温に加熱されたプラズマ中ではドリフト電流という静電場と静磁場が作る電流が存在する。
  - 2、ドリフト電流により電子が流入した領域では電子が増えることで静電場が強くなる。
  - 3、ドリフト電流の周りでは静磁場が増強される(電線の周りに磁場が出来るのと同じ原理)。
  - 4、増強された静電磁場はさらに強いドリフト電流を流す。
- このような 1~4 の流れを繰り返すことでドリフト電流・静電場・静磁場の三者の間に、

お互いに相手の増大を促す関係が構築されます。一度、この関係が構築されると、急激に磁場が成長し、キロ・テスラ級にまで成長することが分かりました。この突発性磁場は電子にとっては高い壁の役割を果たします。図 1(c)に示すように、電子が高い壁を越えるまで、何度も繰り返しレーザーからエネルギーを受け取り、電子が高エネルギーに加速されることが分かりました。さらに、本研究では突発性磁場を発生させるメカニズム[N. Iwata et al., Nature Communications 9, 623 (2018)]を解明し、高効率な電子加速を得るのに必要な照射時間を予測する方程式を導出しました。この方程式を使うことで、複雑なシミュレーションを行わずとも、高効率に電子を加速するのに必要なレーザーパルス幅(照射時間)を決定できます。

### 本研究成果のポイント

- ・高強度レーザーをプラズマに照射すると電子やイオンが加速されます。このレーザー加速器は、従来の加速器よりも高いピーク強度を有するビームを生成できる点が注目され、世界中で研究されています。
- ・加速エネルギーの向上のために、レーザーの高強度化が競われていますが、その結果として装置への負荷が大きくなっています。我々はレーザーを長時間照射することで、レーザーの強度を上げずに装置負荷を低減しつつ、加速エネルギーが向上することを発見しました。
- ・世界最大級のハイパワーレーザー施設 LFEX から照射される高強度のレーザー光を、従来よりも約 10 倍長い時間にわたって物質に照射し続けることで、4 倍以上の効率で高エネルギー電子の加速に成功しました。
- ・コンピュータ・シミュレーションを用いた解析を行い、高効率な電子加速には、プラズマ中で突発的に発生する地上最大級のキロ・テスラ級の強磁場が関与していることを発見しました。
- ・誰でも使用可能な加速機構にするため、今回発見した効率的な電子加速に必要なレーザーパルス幅を決定する方程式を導出しました。
- ・本研究は、レーザー核融合エネルギーの実現に貢献すると共に、小型医療用粒子線加速器などへの応用も期待されます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 S. Kojima, M. Hata, N. Iwata, Y. Arikawa, A. Morace, S. Sakata, S.H. Lee, K. Matsuo, K. F. F. Law, H. Morita, Y. Ochiai, A.Yogo, H. Nagatomo, T. Ozaki, T. Johzaki, A. Sunahara, H. Sakagami, Z. Zhang, S. Tosaki, Y. Abe, J. Kawanaka, S. Tokita, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga, H. Azechi, Y. Sentoku and S. Fujioka	4. 巻 2
2. 論文標題 Electromagnetic field growth triggering super-ponderomotive electron acceleration during multi-picosecond laser-plasma interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42005-019-0197-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 N. Iwata, S. Kojima, Y. Sentoku, M. Hata, and K. Mima	4. 巻 9
2. 論文標題 Plasma density limits for hole boring by intense laser pulses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-018-02829-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 小島完興	4. 巻 25
2. 論文標題 マルチピコ秒レーザーパルスによる静電磁場の自己生成とその相対論的電子加速への影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 レーザー加工学会誌	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小島完興
2. 発表標題 高強度レーザープラズマ相互作用面の高速挙動診断のための高時間分解能FROGの開発
3. 学会等名 日本物理学会2018秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島完興
2. 発表標題 高強度レーザープラズマ相互作用面の高速挙動診断のための高時間分解能FROGの開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島完興
2. 発表標題 高時間分解能FROGを用いた高強度レーザープラズマ相互作用面の高速挙動診断
3. 学会等名 日本物理学会2019年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sadaaki KOJIMA, Yugo OCHIAI, Shunsuke INOUE, Yasunobu ARIKAWA, Mao TAKEMURA, Masaki HASHIDA, Shunsuke FUJIOKA, and Shuji SAKABE
2. 発表標題 Single-shot frequency-resolved optical gating for characterizing the instantaneous intensity and phase of the LFEX laser pulse
3. 学会等名 Eleventh International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島完興
2. 発表標題 高強度レーザープラズマ相互作用面の高速挙動診断のための高時間分解能FROGの開発
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----