

## 研究報告書

### 「新規量子源としての相対論的磁気リコネクション」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015年12月～2019年3月

研究者: 余語 覚文

#### 1. 研究のねらい

プラズマ中において、互いに反対方向の磁場が接触して消失すると、磁力線の繋ぎ変え＝リコネクションが起こる。磁気リコネクションの結果、消失した磁場のエネルギーがプラズマの加熱や粒子の加速につながるため、間接的ではあるが「磁場が荷電粒子を加速する」と言え、新しい粒子加速機構となり得る。

本研究では、この磁気リコネクション現象を、高強度レーザー装置を用いて地上で再現することで理解を進め、得られた知見から、新しいレーザー粒子加速機構を構築することを目指す。

実験手法としては、相対論的な集光強度 ( $>10^{18}$  Wcm<sup>-2</sup>) のレーザーが誘起する磁場同士を接触させてリコネクションを起こす。このとき、集光強度  $10^{18}$ – $10^{19}$  Wcm<sup>-2</sup> のレーザーとプラズマとの相互作用により、1–10 キロテスラ(kT)という非常に強い磁場を誘起してリコネクションを発生させることで、高エネルギーのイオンが加速できることを実証する。

将来的には、磁気駆動型超新星爆発やマグネターなど、高強度磁場が支配する宇宙現象における宇宙線の加速機構の解明を目指すとともに、最適化を進めることで、新しいレーザー粒子加速機構として提案することを目指す。

#### 2. 研究成果

##### (1) 概要

2本の相対論的集光強度のレーザーを僅かにずらして集光し、それぞれのレーザーが誘起する磁場同士を接触させてリコネクションを起こす手法で実験を行った。

その結果、レーザー進行方向に異方性を持つ高エネルギーイオン(陽子、12MeV)の成分を測定した。この成分は、従来のレーザーイオン加速機構(TNSA 機構)、および従来の磁気リコネクションによるプラズマ加速機構(Sweet-Parker 機構など)では説明されないものである。

そこで本研究では、極めて激しい磁気リコネクションが生じることで、プラズマ中の磁場による粒子の運動がドリフト運動として近似できない領域＝non-adiabatic 領域が発生して、レーザー進行方向に誘導電場が発生することでイオンが加速されるという新しい機構を提案する。現在、3次元理論シミュレーションにより、この機構の検証を進めている。

##### (2) 詳細

磁気リコネクションによるプラズマ加熱機構としてよく知られる Sweet-Parker モデル[Parker, Cosmical Magnetic Fields: Their Origin and their Activity, Oxford University Press (1979)]では、図1の上下(y方向)で接近したプラズマの磁場同士が消失して、横方向(x方向)にプラズマ圧力の勾配が発生し、これにより荷電粒子が加速される。しかしながら、近年の理論研究[Speiser, J. Geophys. Res. 70 (1965) 4219, Zenitani and Hoshino, Astrophys. J. Lett. 562

(2001) 63, Bulanov, PPCF 59 (2017) 014029] では、現象が極めて激しくなると、粒子の動きは3次元的になることが提唱されている。図1の磁気消失領域の厚さ( $\delta$ )の方向(紙面奥向き)には電流シートと呼ばれる領域が発生し、生じる誘導電場(E)は

$$c\nabla \times B = 4\pi J + \partial E / \partial t \quad [\text{cgs-gauss}] \quad (1)$$

と与えられる。このとき、右辺第1項の対流電流(J)が無視できるような早い過程が発生したとすると、左辺の磁場が右辺第2項の変位電流( $\partial E / \partial t$ )に効率的に変換されることになる。その時の電子の動きを図2に示す。電

子は磁力線の回りをドリフト運動しながら(adiabatic な近似の成り立つ状態で)押されていくが、磁気消失点近傍ではドリフト運動から逸脱する。すなわち non-adiabatic と言える条件下であり、z方向への加速を受ける。しかしながら、この non-adiabatic 領域近傍で加速現象の解析解を得ることは困難を伴う[Berezinskii et al., Astrophysics of Cosmic Rays, North Holland/Elsevier (1990)]。また、non-adiabatic 領域を直接測定した例はまだ無い。

そこで、本研究では、「この特殊な現象の情報を引き出せるのは、異方向性をもって加速されてくるイオンのみではないだろうか?」と考え、これを実証するための実験を実施した。

実験の概要を図3に示す。集光強度 $\sim 1 \times 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$ 、パルス幅 1.5 ps のレーザー2本を、上下に 50  $\mu\text{m}$  離して集光している。2本のレーザー共に上から見て 42° の角度を付けて入射しているが、従来から知られているイオン加速機構(TNSA)

[Macchi et al., Rev. Mod. Phys. 85 (2013) 751]では、レーザー方向にかかわらず薄膜の裏面垂直方向にイオンが加速される。図3には、エネルギー12 MeVの陽子と考えられるイオンの空間分布を示すが、中央にみられる成分は TNSA 機構によるものと説明できる。しかしながら、その右側(レーザー進行方向寄り)に測定された明らかに異なる成分は説明できない。(この成分は、レーザーを1か所に集光した場合には測定されないことを確認した。)

non-adiabatic 領域の発生に伴う誘導電

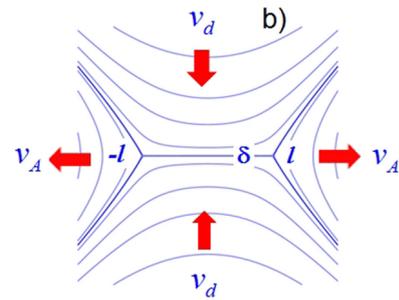


図1: Sweet-Parker モデルにおける電流シート。

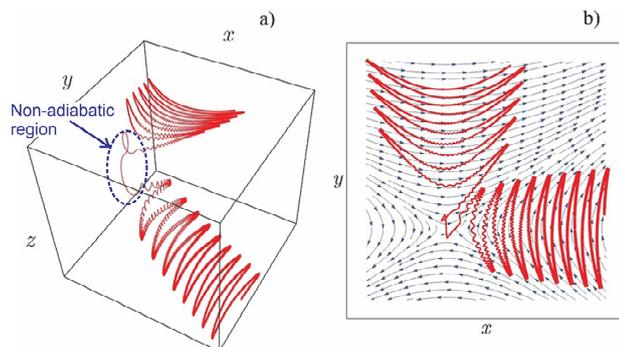


図2: Non-adiabatic 領域における荷電粒子のドリフト運動からの逸脱。図は[Bulanov, PPCF 59 (2017) 014029]より、ただし青字は余語が追記。

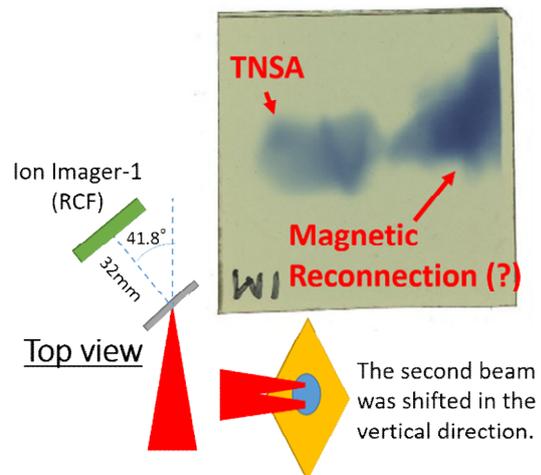


図3: イオン(陽子 12 MeV)の空間分布。

場は、レーザー進行方向に発生することが予想 [Gu et al., PRE 93 (2016) 013203, PoP 22 (2015) 103113] されており、イオンはレーザー進行方向に加速を受ける。したがって、イオンの異方成分は磁気リコネクションによって発生すると説明できる。ただし、non-adiabatic 領域の誘導電場のみで 12 MeV の加速が生じたのか、TNSA などほかの加速機構と相補的に加速が生じたのか、現状では定かではない。

上記の仮説を検証するために、共同研究者(欧州機構、ELI-BL・理論グループ)の協力のもと、3次元シミュレーション(Particle-in-Cell: PIC simulation)を実施しており、理論シミュレーションの成果を先行して論文発表する計画である。

### 3. 今後の展開

高強度レーザーを用いた実験的研究から磁気リコネクションに起因する誘導電場で MeV エネルギーの陽子が加速されたことを示唆する結果が得られた。また、理論シミュレーション研究から、ターゲット密度の制御がカギを握ることが明らかになった。今後は、より広範囲でプラズマ電子密度に対するパラメータサーチを実施することで、磁気リコネクションによる高エネルギーイオン加速機構の確立と最適化を実施する。

### 4. 自己評価

#### ①研究目的の達成状況

高強度レーザーLFEXによる実験において、図3に示したように、磁気リコネクションによる高エネルギーイオン加速を示唆する結果が得られたことは、非常に大きな意義を持つと考える。その一方で、得られた実験結果に対する理論的解釈を、シミュレーションを用いて実施中であるが、現時点では完了しておらず、原著論文での発表は研究期間終了後となる見込みである。

#### ②研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

実験において基盤となるイオンエネルギー分析器[論文 2]を含む計測システムを構築・整備することができた。また、これらのシステムを用いて、準備研究として、これまで未解明の点の多かった ps の相対論レーザーによるプラズマ加熱現象において、レーザー照射時間の経過とともに電子温度が非線形な過程で上昇する効果(時間幅効果[論文 1,3,4])を発見し、プレス発表を実施した。また、PIC シミュレーションをグループ内でも実施するために、クラスター計算機システムを整備した。

また、阪大内の研究者に加えて、欧州機構、ELI-BL、およびロシア科学アカデミー高温研究所との共同研究を開始することで、理論研究者との協力体制を構築できた。

#### ③研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

近年、国際的に、ニュークリアフォトンクス(Nuclear Photonics)という新しい学術分野が出現しつつある。これはプラズマ科学、レーザー科学、加速器科学、核物理学、宇宙物理学、素粒子物理学といった複数の分野を横断する新しい学問領域である。本さきがけ研究は、プラズマ・レーザー・宇宙物理を融合した成果を創出しており、ニュークリアフォトンクスにおける先駆的な成果となったと考える。また、欧州機構の主導する大型レーザー施設群(ELI シリーズ)が本格的稼働を迎える前に、先鞭をつける実験成果が得られたことも意義が大きい。

### 5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

- |  |
|--|
| 1. A. Yogo, K. Mima, N. Iwata, <i>et al.</i> , Boosting laser-ion acceleration with multi-picosecond pulses. <i>Sci. Rep.</i> 7, 42451 (2017).   |
| 2. S. Tosaki, A. Yogo, K. Koga <i>et al.</i> , Evaluation of laser-driven ion energies for fusion fast-ignition research. <i>Prog. Theor. Exp. Phys.</i> 2017, 103J01 (2017).  |
| 3. N. Iwata, K. Mima, Y. Sentoku, A. Yogo <i>et al.</i> , Fast ion acceleration in a foil plasma heated by a multi-picosecond high intensity laser. <i>Phys. Plasmas</i> 24, 073111 (2017).                          |
| 4. A. Yogo, S. V Bulanov, M. Mori <i>et al.</i> , Ion acceleration via ‘nonlinear vacuum heating’ by the laser pulse obliquely incident on a thin foil target. <i>Plasma Phys. Control. Fusion</i> 58, 25003 (2016). |

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表

1. Golovin D. O., Yogo A., Pikuz *et al.*, Diagnosing plasma temperature and ionization stage with high resolution x-ray spectroscopy in ion acceleration processes driven by picoseconds relativistic laser pulses, 日本物理学会第73回年次大会 2018/3/24、東京理科大学
2. D. Golovin, A. Yogo, T. Pikuz *et al.*, Investigation plasma parameters of Cu wire/Al foil combined target heated by high intensity LFEX laser pulse, HEDS-OPIC2017, 23-26 Apr2018, Yokohama, Japan
3. D. Golovin, A. Yogo, T. Pikuz *et al.*, Development of laser driven kilo-Tesla magnetic field generator in micron scale, HEDLA2018, 30 May-1 June 2018, Kurashiki, Japan
4. D. Golovin, S. Bulanov A. Yogo *et al.*, Observation of the accelerated ions during magnetic reconnection experiment on the LFEX laser facility, 2018/9/10、同志社大学
5. dual ps high-intensity laser pulse incidence on a foam target
6. D. Golovin, A. Yogo *et al.*, Indications on the ion acceleration with a magnetic reconnection induced by dual ps high-intensity laser pulse incidence on a foam target, AAPPS-DPP, 12-17, Kanazawa, Japan

受賞

1. 「レーザープラズマ加熱における時間幅効果の発見と粒子加速の効率化の研究」 余語覚文、大阪大学賞(若手教員部門)、2017年11月21日

プレスリリース

1. 2017年2月15日 日経産業 朝刊8面「阪大 レーザーで粒子線発生、強度100分の1で実現 がん治療装置、小型化にらむ」
2. 2017年2月14日 NHK ニュース「粒子線を効率よく生み出す新技術」



3. 2017年3月2日 朝日 朝刊 20面「レーザー光で粒子加速 効率化」
4. 2017年2月13日 共同通信「レーザー粒子加速を効率化 大阪大など がん治療に期待」
5. 2017年2月20日 日刊工業 朝刊 16面「レーザーで粒子加速 阪大、新手法を発見 粒子線がん治療に応用」