

メガテスラ磁気再結合による極超高エネルギー 粒子加速の3次元シミュレーション

村上 匡且

大阪大学 レーザー科学研究所

1. はじめに

磁場は近代物理学における最も基本的な概念の一つであると同時に、常に科学技術の最先端を切り開いてきた物理要素でもある。身近な例で磁場強度を比較すると、地磁気は0.3~0.5 Gauss、磁気ネックレスは0.1 Tesla (=1 千Gauss)、病院で使われる磁気断層写真(MRI)やリニアモーターカーでは約1 Tesla (=1 万Gauss)、将来のエネルギー源である磁場核融合ではキロテスラ (=1 千万Gauss)が必要とされる。こうして、高強度磁場を生成させることで医療・エネルギー・産業といった様々な応用が我々の実生活に寄与してきた。過去半世紀以上に渡って様々な方式を使った磁場強度の増強が追求されてきたが、これまで人類が地上で実現した最大の磁場強度は1~2キロテスラでありこの壁を未だ超えるに至っていない。仮に、キロテスラ(kT)を更に2~3桁上回るメガテスラ(MT)の磁場が実証されれば、これまで議論の俎上にさえ載らなかったような量子論効果や宇宙物理の未開拓領域において、実験室での能動的な基礎研究が展開できることになり、基礎科学に及ぼすインパクトは計り知れない。そうした未開拓物理の一つが「磁気リコネクションと粒子加速」であり、本研究における主題でもある。本研究は(1)メガテスラ磁場の生成、(2)磁気リコネクションによる高エネルギー粒子加速、という2つの構成要素からなる。

2. メガテスラ磁場の生成原理

最近提案されたマイクロチューブ爆縮[1]と呼ばれる新たな方法でメガテスラ磁場を生成することができる。直径10ミクロン程度の円筒中空構造の外側からピコ秒程度の短パルス長を持つ

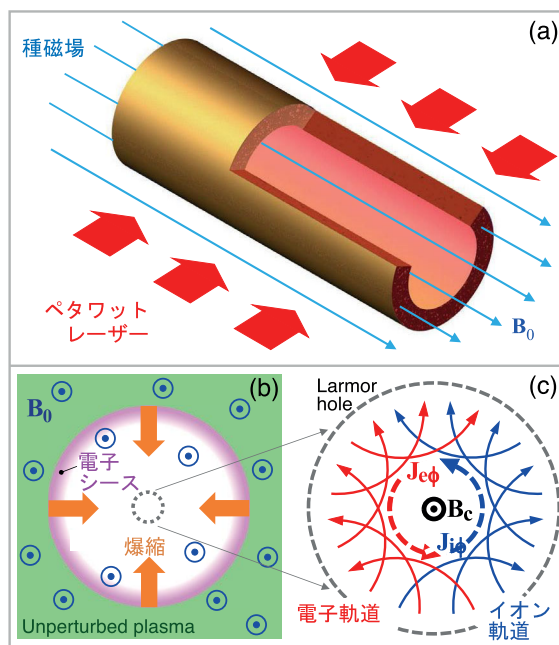


図1: マイクロチューブ爆縮の原理図

超高強度のペタワットレーザーを照射し5~10 MeV程度の高エネルギー電子を発生させる。ただし事前にkT程度の種磁場をターゲット内部に染み込ませておく。チューブ内表面のイオンは電子雲と共に円筒軸方向に加速・膨張を開始する。これらのイオン・電子は、ローレンツ力により各々時計方向・反時計方向に偏向を受け、中心部で半時計方向の強力なスピンの電流を形成する。電子はイオンと反対方向の回転運動をするが、互いに逆の符号の電荷を持つため、結局、イオンと電子は「協働」して種磁場を増幅する形で超高強磁場を生成し、中心軸上に生成される磁場はメガテスラのオーダーとなる。

3. 磁気リコネクションによる粒子加速

磁気リコネクション(Magnetic Reconnection)は、磁力線のトポロジカルな変化によって、磁場から

プラズマ内の荷電粒子へのエネルギー変換を可能にする [2]。コロナ質量放出 [3]、太陽フレア [4]、惑星磁気圏の閉鎖 [5]、 γ 線バースト [6]、パルサー風 [7] などのさまざまな天体物理学的プロセスは磁気リコネクションに関連しており、現在、磁気リコネクションは、主に宇宙プラズマにおける荷電粒子の加速メカニズムを説明する物理機構であると考えられている [8]。特に、最近の研究から、相対論的磁気リコネクションによる電子加速が注目されている。

近年、高出力レーザーは、レーザーとプラズマの相互作用を介して相対論的磁気リコネクションを調べるユニークなツールとなっている。CPA 技術 [9] の発明以来、大きな進歩が達成され、最先端のレーザー強度は 10^{22} W/cm² を超える [10]。数値シミュレーションは、約 100MG の電界強度を予測し、最近の実験結果では約 10MG が得られている。

一般にレーザー強度と共に磁場強度と荷電粒子エネルギーは増加し相対論的条件に近づく。このような場合、局所磁場の変動は、電子速度の相対論的制約により飽和した電流では維持できなくなる。変位電流からの寄与が重要になり、対応する誘導電界が磁気リコネクション電流シート内の荷電粒子を大幅に加速する。このことは、抵抗 MHD 近似と一般化されたオームの法則を再考する必要があることも意味する。このような磁場の動的消散は、最近の数値的および理論的研究で明確に示されている。これらの研究では、磁場は主に、レーザー場または航跡場によって加速された高エネルギー電子ビームによって形成される。したがって、対応する電流シートは、レーザーの伝播と一緒に移動している。磁気振幅はギガガウスと高いが、荷電粒子と電流シートの対流運動により、磁気リコネクションによって局所プラズマを効率的に加熱することは容易ではない。

4. ペイズリーターゲット

本研究では、無衝突相対論的な磁気リコネクションの配位の生成に、一対のペイズリーターゲット

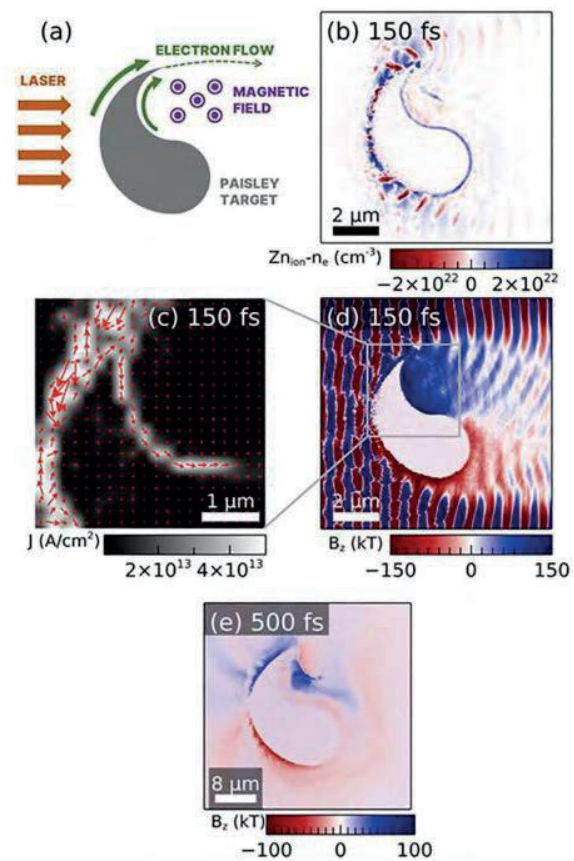


図2：ペイズリーターゲットによる強磁場生成

ト [11] とペタワットレーザーの相互作用を利用している。まず単体としてのペイズリーターゲットのパフォーマンスを見てみよう。図2に示されるように、表面電流がターゲットの凹面側に磁場を生成し、磁場に簡単にアクセスできるのが特徴である。このオープンスペースにより、系に入ってくる粒子が磁場と相互作用しやすくなる。さらに、後で見るように、2つ以上のペイズリーターゲットをモジュラー方式で接続でき、生成された磁場が互いに相互作用できるようになる。したがって、ペイズリーターゲットは2つ以上の磁場源の相互作用を必要とする実験に適しており、結果として磁気リコネクション、磁気ミラー、およびその他の実験室での天体物理学実験などの磁場現象を研究するための、さまざまな配置設計が可能となるのである。

5. ダブルペイズリーによる磁気リコネクション

図3には、対称的に配置した一対のペイズリーターゲットを使うと磁気リコネクションが生成

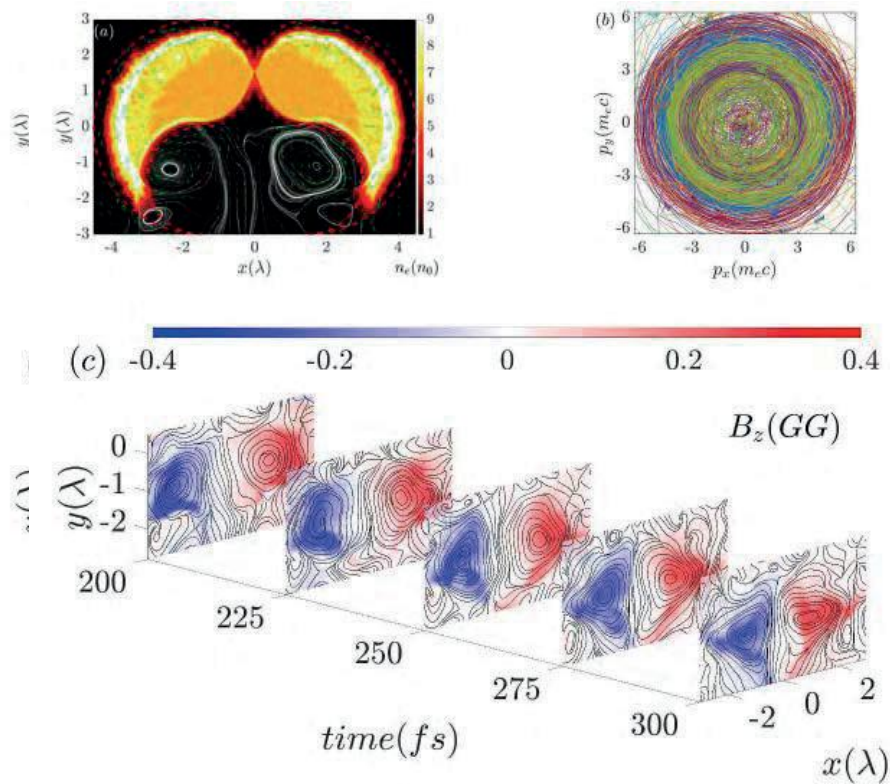


図 3 : ダブルペイズリーターゲットによる磁気リコネクション

される状況が示されている。ペイズリーターゲットのそれぞれの裏側に、高強度のレーザーパルスが照射されると、電子の渦運動により安定した磁場が生成される。レーザーで照射されることにより、ペイズリーターゲットの尾部（厚さが薄くなっている箇所）にある電子は急速に真空に射出される一方で、慣性が大きいため相対的にゆっくりと移動するイオンによって正電荷領域が出現する。この結果、ペイズリーターゲット表面を流れる電流が形成され、2つのペイズリーターゲットで挟まれた空間内に、特に強い静磁場が形成されることになる。

高エネルギーの電子ビームによって発生する磁場とは異なり、ここでは磁場は渦のドリフト速度でゆっくりと移動しているのが観測される。一对のペイズリーターゲットのターゲットが向かい合っているため、生成された逆極性の磁場は、磁気圧力と密度勾配によって押されて互いに接近することになる。磁場エネルギーは、再結合プロセスを介して2つの渦の間に圧縮された荷電粒子を加速するために消散する。粒子シミュレーションで得られた結果は、電流シートで加熱され

た電子が2つの温度を持つことを示している。これらのシミュレーション結果を解析した結果、低温電子は Sweet-Parker モデルに従って加熱され、高温電子は主に変位電流から成長する誘導電場によって加速されることがわかった。

上記の粒子シミュレーション結果は相対論的粒子コード EPOCH を使って得られた。使用したペイズリーターゲットは、初期の炭素イオン密度は $n_0 = 3 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 、電離電荷 $Z = +6$ および原子質量数 $A = 12$ である。2つの直線偏光レーザーパルスが正および負の x 境界から入射し、ターゲットの裏側に照射されている。それぞれのピーク強度は 10^{21}W/cm^2 で、パルス持続時間は 50 fs である。この時の正規化された振幅は $a_0 = eE_L/m_e \omega c \approx 27$ である。ただし、 E_L と ω はレーザー電界強度と周波数、 e と m_e はそれぞれ電子の電荷と質量を表す。また、 c は真空中の光速であり、レーザー波長は $\lambda_L = 1 \mu\text{m}$ を採用した。ターゲットの横方向のサイズは $6 \mu\text{m}$ 未満であるため、ここではレーザースポットは平面波であると想定することができる。シミュレーションボックスのサイズは $10\lambda \times 10\lambda$ 、メッシュ

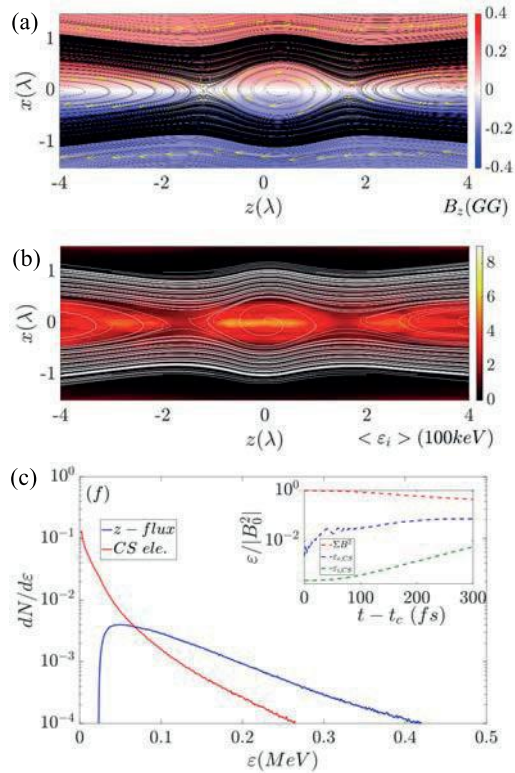


図4：磁気リコネクションによる粒子加速

サイズは $\delta x = \delta y = \lambda/100$ とした。すべての仮想粒子（セルあたり 370 個）は、初期において静止状態にあり、粒子と場の両方に開放境界条件を適用した。図4は磁気リコネクションのダイナミクスを表したもので、(a)はレーザーピーク時の磁場強度分布を、(b)はイオンの運動エネルギー分布を表している。また、(c)は加速電子のエネルギースペクトルを表し、同図内に入れ子状に組み込まれた図表は、磁場と粒子（イオン、電子）のエネルギーの時間発展を表している。

6. おわりに

本報告は、メガテスラ級の超高電磁場をレーザーを使った実験で生成し磁気リコネクションに関する実験提案を行うべく、粒子シミュレーションを使った研究成果をまとめたものである。システムを持つ磁気極性は、ペイズリーターゲットの非対称構造に由来する逆らせん電子渦によって生成されていることがわかった。また、密度勾配と磁気圧力によって、磁気双極子が消滅し、磁力線が中央領域で再結合することもシミュレ

ーションから明らかとなった。ここでは、強力な磁場強度と小規模な長さ内での集中的な変動のために、リコネクションプロセスはもはや準定常的にはないものと推察される。ペイズリーターゲットに関して言うと、その形状が正確にペイズリー形状そのものである必要はないことを付記しておく。明らかに非対称な分布を持つ同様のターゲットも、ペイズリーとほぼ同様の磁場を生成することがわかっており、これは換言すると、同ターゲットの安定性を意味している。今回得られた結果は、高出力レーザー施設が相対論的磁気リコネクションの研究において独自の方法を、しかも高いポテンシャルを持って提供できることを示している。これにより、天体物理的観点から系をスケールアップする際に、重要な強磁場中での磁気リコネクションの動的プロセスを、さらに深く理解することが期待される。

参考文献

- (1) M. Murakami et al., *Sci. Rep.* **10**, 16653 (2020).
- (2) V.S. Berezhinsky, et al., *Astrophysics of cosmic rays* (North Holland, Amsterdam, Netherlands, 1990)..
- (3) Q. Jiong et al., *Astrophys. J.* **604**, 900 (2004).
- (4) E.N. Parker et al., *J. Geophys. Res.* **62**, 509 (1957).
- (5) B. Coppi et al., *Phys. Rev. Lett.* **16**, 1207 (1966).
- (6) D. Giannios, *Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett.* **408**, L46 (2010).
- (7) Y. Lyubarsky et al., *Astrophys. J.* **547**, 437 (2001).
- (8) M. Melzani et al., *Astron. Astrophys.* **570**, A111 (2014).
- (9) D. Strickland et al., *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985).
- (10) V. Yanovsky et al., *Opt. Express* **16**, 2109 (2008).
- (11) M-A. H. Zosa et al., *Appl. Phys. Lett.* **120**, 132403 (2022).