

jh240007

マイクロトroidalによるプロトン・ボロン磁場核融合の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)

概要

超強磁場は、内面がノコギリの歯のように周期的に傾斜した「ブレード状マイクロチューブ」を用いることで生成される。このマイクロチューブの外側に、非常に強力で極短パルスのレーザー光を照射すると、メガ電子ボルト級の高エネルギー電子が発生し、内面に沿ってイオンと電子が中心に向かって爆縮する。このとき、ノコギリ形状の構造によって、収縮してきたプラズマが中心で収束する際、渦状の流れが形成され、これにより、強力なループ電流が生じる。その結果、ギガガウス級の超強磁場が発生する。本研究では、数値粒子シミュレーションおよび簡易的な理論モデルによって、こうした現象の背景にある物理的メカニズムや、主要なスケールリング関係を明らかにした。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

大阪大学 D3 センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

村上匡且：総括・モデリング

佐野考好：粒子シミュレーション

研究の目的と意義

現在、究極のクリーンエネルギー源として各国の研究者が鎬を削って研究しているのがプロトン・ボロン($p^{11}B$)核融合である。その理由は、 $p + ^{11}B \rightarrow 3\alpha + 8.7\text{MeV}$ (メガエレクトロンボルト) という反応式に見る通り他の核融合反応と異なって中性子が全く出てこない。換言すると $p^{11}B$ 反応が放射能の危険性の無い極めてクリーンなエネルギー源であることを意味している。ただ、必要とされるプロトンとボロンの衝突エネルギーは約 600 MeV (6 兆度の温度エネルギーに相当) であり、

従来の重水素-三重水素(DT)燃料を使う場合よりも一桁高い。それ故、従来のレーザー核融合や磁場閉じ込め核融合方式では $p^{11}B$ 核融合に適したプラズマ環境を作るのは極めて困難と考えられている。かくして「如何にしてプロトン・ボロンの混合プラズマを効率良く圧縮し極小空間に閉じ込め、その結果としての核融合反応を得るのか」 - その手法自体を世界が暗中模索しているというのが現状である。

ところで、これまで実験室で人工的に生成・観測された最大の磁場強度は 1~2 キロテスラ(kT) である。仮に、キロテスラを更に 3 桁上回るメガテスラ(MT)クラス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。

本申請者は 2019 年、ミクロンサイズの中空円筒 (マイクロチューブ) 構造体に超高強度レーザーを照射することで、メガテスラ級磁場を生成させる新原理の着想を得た (図 1、科研・挑戦的萌芽、代表：村上匡且、令和 2~3 年度採択)。

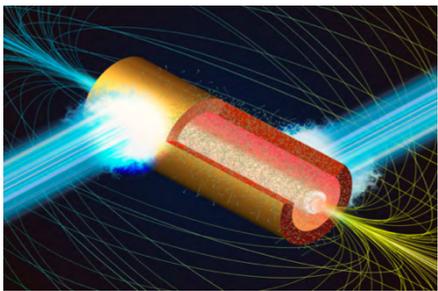


図 1. マイクロチューブ爆縮の概念図
毛髪径のわずか 10 分の 1 程度の中空洞筒体を強力なレーザーで照射することで軸方向に極超高磁場が生成される。

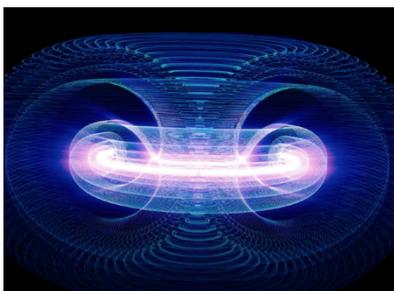


図 2. マイクロトロイダル爆縮概念図
マイクロチューブをドーナツ状(トロイダル)にすることで中心リング上にメガテスラ級の超高磁場が生成され、この磁場空間にプラズマが閉じ込められ $p^{11}B$ 核融合反応が起こる(特許出願中)。

翌 2020 年、理論・シミュレーションにより、同原理の正当性を明らかにした [1]。現在、阪大レーザー研の超高強度レーザー LFEX 装置を使った原理実証実験が進行中である(科研・基盤研究 (A)、代表：村上匡且、令和 3～7 年度採択)。

今般、申請者は、上記のマイクロチューブの物理コンセプトから、さらに新たなコンセプトである「マイクロトロイダル」の構想を得た(図 2)。そのミクロンサイズのドーナツ構造体の中心リング付近に生成されるメガテスラ級の極超高磁場をもってプロトン・ボロンの燃料プラズマを局所空間に閉じ込め $p^{11}B$ 核融合を実現しようと言うものである。

本研究では、スパコンを使って、現実的なレーザーとプロトン・ボロン混合プラズマの相互作用を考慮した 3 次元の粒子シミュレーションを行う。それによって、ミクロンスケールのトロイダル構造内部に形成される極超高磁場中のプラズマ挙動を精査すると共に人類未到の「メガテスラ磁場環

境下でのマイクロトロイダル核融合」を世界で初めてデモンストレーションすること、そしてその学理構築および理論設計を目的とする。

2. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本研究は、JHPCN が掲げる「学際的課題の解決に向けた大規模情報基盤の高度活用」という目的に沿って実施されたものである。公募型共同研究という枠組みにより、異分野の知見や計算資源が結集され、個別の研究機関では困難な高度かつ複合的な問題設定に取り組むことが可能となった。とりわけ、本拠点が提供する計算基盤と専門的人材の支援は、研究の深化と加速を促し、学際研究の推進という観点からも極めて意義深いものであった。

3. 前年度までに得られた研究成果の概要

オリジナルのマイクロチューブ爆縮の動作原理においては、空間的に一様な種磁場の存在が必要であった。これに対して、最近、マイクロチューブの内壁に図 4 に示すようなマイクロブレード構造を導入することで高速電子流に渦構造を形成させることができ、結果として種磁場無しでもメガテスラ級の超高磁場を生成できることが SQUID を使ったシミュレーションにより明らかとなった。

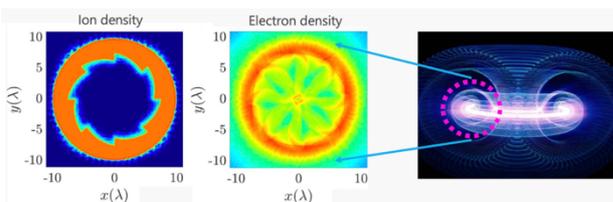


図 3. (左)マイクロブレード構造をシリンダー内表面に与えると(中)電子は種磁場が無くても渦構造を持ち、結果として超高強磁場を生成できることがわかった。これら SQUID を使った 2 次元シミュレーション結果は、(右)図に示すようにマイクロトロイダルの断面における振る舞いとして捉えられる。

4. 今年度の研究成果の詳細

本研究は、高エネルギー密度物理および実験的天体物理における重要課題の一つである「極限的磁場の創出」に対して、全く新しいアプローチを提案し、その有効性と物理的基盤を理論およびシミュレーションの両面から明らかにしたものである。従来のアプローチでは、大規模な外部磁場生成装

置を必要とすることが多く、設備的・運用的な制約が研究の発展を阻害してきた。これに対し、我々が提案する「ブレード付きマイクロチューブインプロージョン (BMI)」は、マイクロ構造体の幾何設計と超短パルスレーザーの活用によって、外部磁場に依存せず自己完結的にギガガウス級の超強磁場を生成する革新的手法である。

本研究では、高エネルギー密度物理および実験的天体物理における重要課題の一つである「極限的磁場の創出」に対して、全く新しいアプローチを提案し、その有効性と物理的基盤を理論およびシミュレーションの両面から明らかにしたものである。従来のアプローチでは、外部に大規模なシ

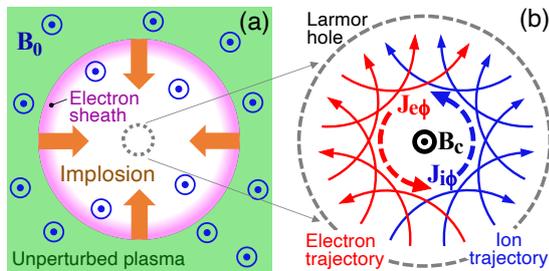


図4 (a) マイクロチューブのインプロージョン中における内側プラズマの力学を上から見た図。内壁プラズマは等温膨張し、レーザーによって生成されたホットエレクトロンによって真空中へと駆動される。(b) 中心部では、外部シールド磁場 B_0 の存在により、イオンと電子が互いに逆方向へ偏向され、それによって形成された集団的電流により、超強磁場 B_c が生成される。

ド磁場生成装置を必要とすることが多く、設備的・運用的な制約が研究の発展を阻害してきた。本研究で提案された「ブレード付きマイクロチューブインプロージョン (BMI)」は、そうした制約を回避し、マイクロ構造体の幾何設計と超短パルスレーザーの活用によって自己完結的にギガガウス (GG) 級の磁場を生成するものである。

本研究の要となるターゲットは、円筒状のマイクロチューブであり、その内壁に「のこぎり状」あるいは「ブレード構造」とも呼べる周期的傾斜を設けている。レーザーによってこの内壁が加熱されると、メガ電子ボルト級のホットエレクトロンが生成され、ブレード面に沿ってイオンが法線方

向に加速される。これにより、ターゲット内壁から中心方向への収束運動 (インプロージョン) が始まるが、このとき、内壁の非対称性が作用し、周方向のループ電流が自然発生的に誘導される。これこそが BMI 方式における磁場生成の核心であり、外部磁場がなくとも、自己整合的に数百キロテスラからギガガウス級の磁場を誘導可能となる。

本研究では、2次元粒子-in-セル (PIC) 法を用いて詳細なシミュレーションを実施し、物理過程の時間発展、空間分布、スケーリング関係を解析した。使用したシミュレーションコードはオープンソースの EPOCH であり、炭素をターゲット物質とし、完全電離状態 ($Z=6$) を仮定。初期電子密

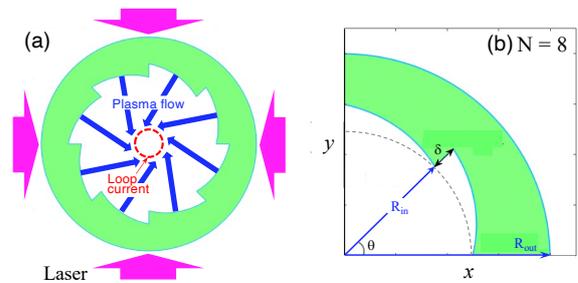


図5 (a) BMI (ブレード付きマイクロチューブインプロージョン) の基本的なメカニズムを示す概略図。ホットエレクトロンが円筒形ターゲットの傾斜した内面 (ブレード) を均一に加熱することで、イオンがブレード面に垂直な方向へ、かつ周方向の運動量を伴って加速される。これにより円筒対称性が破られ、中心軸に沿ったループ電流が誘導され、外部シールド磁場なしで超強磁場が生成される。(b) ブレードの本数は任意に設定できるが、本図では例として8枚のブレード構成が示されている。

度 $n_{e0} = 1.8 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ 、シミュレーションボックスは $22 \times 22 \text{ } \mu\text{m}$ 、格子間隔 10 nm で設定された。レーザーは波長 $0.8 \text{ } \mu\text{m}$ 、強度 10^{21} W/cm^2 、4方向から照射し、照射方向に直交する偏光をもつ平面波とした。中心領域に形成される渦状流れ (ラーモアホール) は、イオンと電子の反対方向の回転によって強いループ電流を生み出し、自己帰還的に磁場を増幅させる。この正帰還過程は、従来のスキームでは見られなかった新規性を持つ。注目すべき成果として、生成磁場の極性が初期条件に依存して反転し得るという「極性転換現象」が確認

された。これは、中心領域の電子の運動と周囲の電磁場との相互作用によって引き起こされる現象であり、磁場ベクトル設計の新たな可能性を示唆するものである。数値モデルにより、初期速度や電場構造の微細な違いによって、電子流の回転方向が切り替わることが実証された。

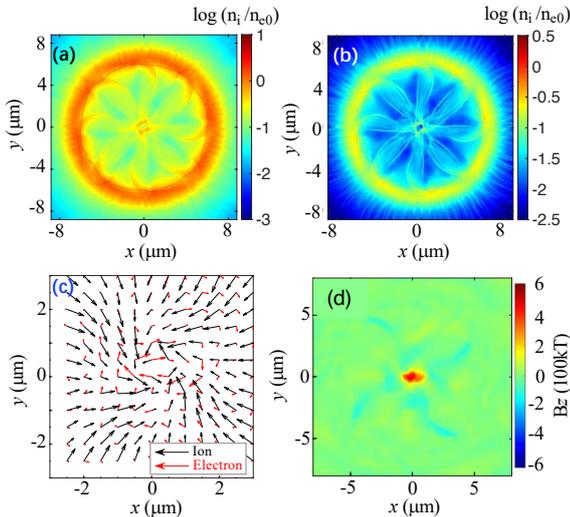


図6 中心磁場が立ち上がり始める時刻 ($t = 300$ fs) における主要な物理量の二次元分布を示す。(a) 電子密度分布、(b) イオン密度分布、(c) イオン (黒矢印) および電子 (赤矢印) の速度ベクトル。特に中心領域では、イオンが反時計回り、電子が時計回りに運動しており、両者が協調して反時計回りの電流を形成していることが分かる。(d) この電流によって自己生成された磁場分布。

特に焦点を当てたのが、ターゲットの幾何構造-ブレード数 (N)、内半径 (R_{in})、外半径 (R_{out})、ブレードの深さ (δ) -が磁場生成に及ぼす影響で

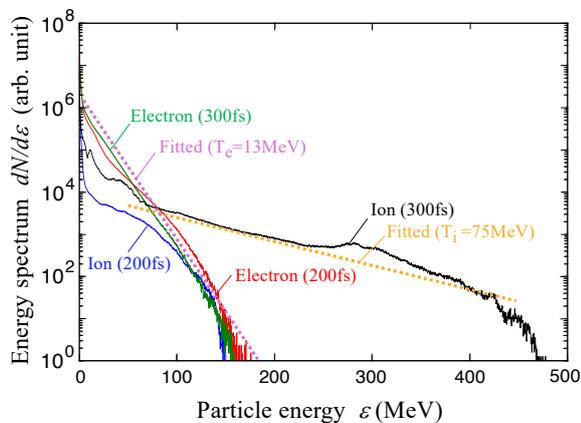


図7 中心での収束プラズマの崩壊前 ($t = 200$ fs) および崩壊後 ($t = 300$ fs) の2つの時刻におけるイオンと電子のエネルギースペクトル。

ある。シミュレーションにより、 $N=8$ の場合に最も高い磁場強度と持続性が得られた。これは、4方向からのレーザーと幾何的に最も整合する条件であること、ならびに中心でのループ電流の形成が最も効率よく行われることに起因する。

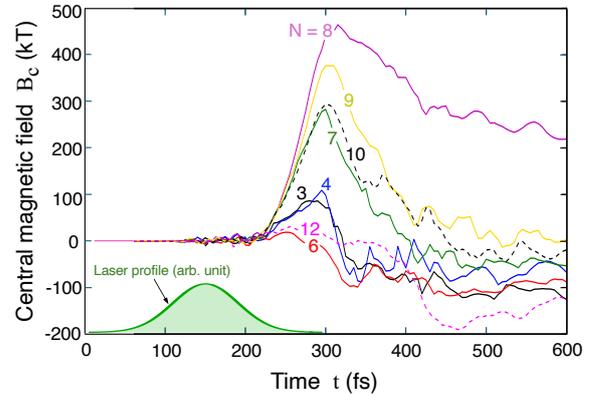


図8 ブレード数 N の異なる場合における、中心磁場 B_c の時間変化を示す。特に $N = 8$ の場合には、最も強くかつ持続的な磁場が得られており、磁場の増幅においてターゲットの最適な幾何構造の重要性が強調されている。

収束運動が進み、 $t \approx 300$ fs 付近で中心領域にホットエレクトロンとイオンが集中すると、粒子の軌跡は中心を取り巻く「渦状流れ」となり、いわゆる「ラーマーホール」と呼ばれる空間構造が形成される。これは、イオンと電子の運動方向が逆向き (時計回りと反時計回り) となることから、両者の電流が同一方向に重なり、強いループ電流 (peta-A/cm² オーダー) を生み出す。この電流によって、局所的に数百キロテスラに達する強磁場が発生することが確認された。

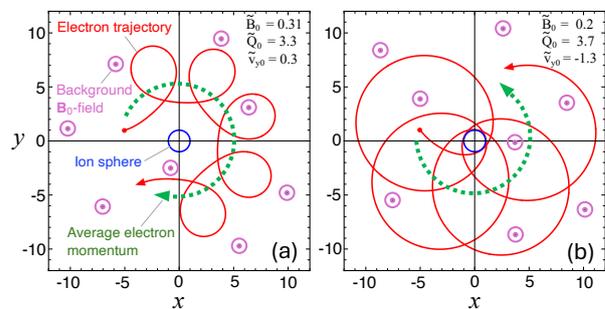


図9 簡略化された数値モデルを用いて、電子の時計回りおよび反時計回りの運動を示した図。(a) では誘導磁場が背景磁場と同じ向きに揃い、(b) では逆向きとなっている。これは、電子とその周囲の電磁場との相互作用によって、磁場の極性転換が引き起こされ得ることを示している。

このプロセスは、ループ電流と磁場生成が互いに正帰還的に作用し合う自己増幅過程である。つまり、一度形成されたループ電流が磁場を強め、その磁場がさらに粒子の軌道を拘束し、結果的に電流密度が増し、磁場も増強される。この自己組織的過程は、従来の外部磁場依存型スキームでは見られなかった新規性である。

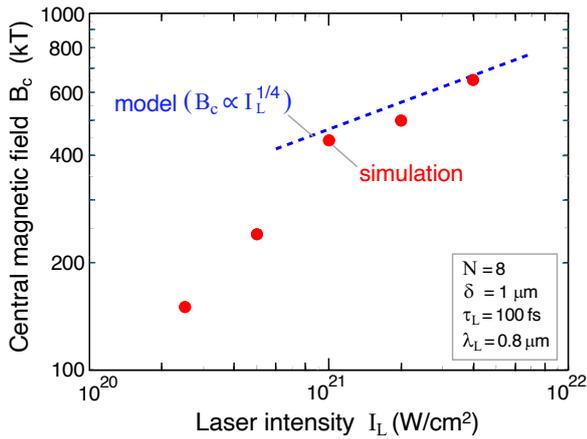


図 10 レーザー強度 I_L に対する中心磁場 B_c のスケールリング (比例関係) を示す。モデルによる予測 (青の破線) は、レーザー強度 $I_L > 10^{21}$ (W/cm²) の領域において、シミュレーション結果 (赤丸) を良好に再現している。

理論的解析としては、運動論モデルに基づき、中心磁場 B_c のスケールリング則 $B_c \propto I L^{1/4}$ が導出された。これはレーザー強度 $I L$ を変化させた一連のシミュレーションでも良好に再現され、レーザーが 10^{21} W/cm² を超える領域では特に一致度が高かった。これにより、今後の実験設計において必要とされるレーザー条件の見積もりやターゲット設計の最適化に向けた指針が得られる。

マイクロブレードシステムにおけるラーモアホールの典型的なサイズは、自己制御的に形成される磁場 B_c のもとで、次のように見積もることができる。質量 m_i 、電離度 Z 、速度 v_i を持つ単一のイオンが一様磁場 B_c の中を運動していると仮定する。ラーモアホールの半径 r_H は、対応するラーモア半径と同程度であると予想される。即ち、

$$r_H \sim r_L = m_i v_i / Z e B_c,$$

ここで e は電子の電荷である。

一方、同じ種類のイオンの一様なフラックス (流束) が、数密度 n_i で半径 r_L の円を回転しているとき、中心に誘導される磁場はアンペールの法則に基づいて次のように見積もられる：

$$B_c \sim 4\pi j_i r_L / c^2,$$

ここで、イオン電流密度 $j_i = Z e n_i v_i$ 、 c は光速である。これらの関係式から、次の式が得られる：

$$r_L \sim (m_i c^2 / 4\pi Z^2 e^2 n_i)^{1/2}, \quad (1)$$

$$B_c \sim (4\pi n_i T_e / c)^{1/2}, \quad (2)$$

ここで、インプロージョン過程において加速されたイオンは、ホット電子と同程度の運動エネルギーを持つと仮定されており、すなわち $m_i v_i^2 \sim T_e$ である。

さらに、中心磁場における極性反転 (B_z の符号変化) についても注目すべき知見が得られた。これは、中心領域での電子の運動と電磁場の相互作用により、電子電流の方向が変化し得ることを示唆しており、シンプルな数値モデルによって反時計回り/時計回りの運動が初期運動量や電場配置の微細な差で切り替わることが実証された。これにより、将来的な極性制御による磁場のベクトル設計も視野に入ってくる。

最後に、収束して中心に捕捉されたイオンが、生成された磁場によって空間的に拘束され、運動エネルギーを熱エネルギーへと変換する現象も観測された。これは、実質的に「磁場による閉じ込め加熱」が達成されたことを意味し、イオン温度が最大 75 MeV に達することが確認された。このような短時間・高密度・高温のプラズマ状態は、核融合研究においても極めて価値の高い条件である。

以上の成果は、BMI 方式が高エネルギー密度プラズマ制御の新たなプラットフォームとなる可能性を示している。特に、複雑な磁場生成装置に頼らず、幾何構造の工夫と短パルスレーザーによって極限的磁場を誘導できるという点は、学際的研究においても極めて意義深い。今後、実験的検証と

さらなる設計パラメータの最適化が進めば、BMI スキームはレーザー核融合、粒子加速、天体模擬実験など多岐にわたる分野で応用されることが期待される。これらの成果は、BMI 方式が極限プラズマ環境の制御において極めて有望であることを示しており、将来的にはレーザー核融合や高エネルギー粒子加速、さらには宇宙物理模擬実験など、幅広い分野への応用が期待される。

5. 進捗状況の自己評価と今後の展望

当初立てた研究計画は、各ステップにおいて概ね予定通りに進行し、シミュレーション解析を中心とした理論的検証は当初の想定を上回る精度で遂行されたと評価できる。特に、ターゲット形状の工夫による磁場生成メカニズムの解明や、それに基づくスケーリング則の導出と妥当性確認に関しては、当初想定していた技術的・学術的目標を着実に達成できたと考えている。また、本研究の進捗を通じて、幾何構造の調整による磁場制御という新たな研究方向性も見出されつつあり、その意味でも高い意義があった。

今後の展望としては、本研究で得られた成果をもとに、理論および数値解析にとどまらず、実験的検証に向けた新たな計画を立案・推進していく必要がある。とりわけ、提案したブレード構造付きマイクロチューブの実験的製作可能性の検討、ならびにレーザー照射条件との整合性確認が重要であり、材料科学や微細加工技術との連携も視野に入れて進める必要がある。また、自己生成磁場の計測手法や、磁場の空間分布・時間発展を捉えるための診断技術の確立も課題として挙げられる。これらを踏まえ、今後はシミュレーションと実験の相互補完による研究体制の構築を図り、より実証性の高い成果へと発展させていく方針である。

参考文献

1. Z. Gu, H. Luo, H. Zhang, S. Zhao, X. Tang, Y. Tong, Z. Song, F. Tan, J. Zhao, and C. Sun,

Journal of Physics: Conference Series 500, 142018 (2014).

2. A. Choudhary, T. Dhalia, C. Aparajit, A. Lad, A. Dulat, Y. Ved, R. Juneja, A. Das, and G. Kumar, arXiv preprint (2023), arXiv:2310.03420.
3. Y. Matsuda, *Journal of Material Sciences* (2018), 10.4172/2321-6212-C6-029.
4. G. Gregori, B. Reville, and F. Miniati, *Physics Reports* 601, 1(2015).
5. Y. Shi, A. Arefiev, J. X. Hao, and J. Zheng, *Physical Review Letters* 130, 155101 (2023).
6. V. Prat, S. Mathis, B. Buysschaert, J. Beeck, D. Bowman, C. Aerts, and C. Neiner, *Astronomy & Astrophysics* 635, A106 (2020).
7. J. MacDonald and D. Mullan, *The Astrophysical Journal* 850, 58 (2017).
8. S. Bhattacharya, S. Das, L. Bugnet, S. Panda, and S. Hanasoge, *The Astrophysical Journal* 956, 44 (2024).
9. P. Lalousis, S. Moustazis, H. Hora, and G. H. Miley, *Journal of Fusion Energy* 34, 62 (2015).
10. K. Li, Z. Liu, Y. L. Yao, Z. Zhao, C. Dong, D. Li, S. Zhu, X. T. He, and B. Qiao, *Nuclear Fusion* 62, 076008 (2022).
11. W. Chen and Z. Wang, *Chinese Physics Letters* 37, 125001 (2020).
12. L. Comisso, G. R. Farrar, and M. Muzio, arXiv: 2401.08913 (2024), preprint.
13. O. B. Zaslavskii, *Mod. Phys. Lett. A* 29, 1450112 (2014).
14. S. E. Guidoni, C. R. DeVore, J. T. Karpen, and B. J. Lynch, *Astrophys. J.* 820, 60 (2016).
15. Z.-Q. Huang, B. Reville, J. Kirk, and G. Giacinti, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 524, 1731 (2023).
16. H. Feng, Z. Zhou, Y. Wu, Z.-J. Gao, Y. Liang, N. Huang, L. Yan, H. Deng, Y. Du, R. Li, W. Lu, W. Huang, and C. Tang, *Physical Review Applied* 15, 044032 (2021).

※7. 研究業績はウェブ入力です