

ホイッスラー波を利用した新奇なレーザー核融合デザインの探索

佐野 孝好

大阪大学 レーザー科学研究所

1. はじめに

慣性核融合研究の究極的な目標は、高密度のイオンを如何に効率的に加熱し核融合反応を起こすかである。つまりレーザー駆動慣性核融合では、注入するレーザーエネルギーを、燃料物質であるイオンの熱エネルギーに効率的に変換できなければならない。しかし、通常はレーザー・プラズマ相互作用の最初の段階で、電磁波のエネルギーのほとんどが電子に輸送されてしまうという根本的な課題がある。その場合、電子からイオンへのエネルギー変換は衝突過程を通じてゆっくりと進行し、一般にその効率も非常に悪い。したがって、もし電磁波からイオンに直接エネルギー変換できる物理機構が見つければ、この課題を解決する重要なブレイクスルーになりうる。そして、例えば高速点火方式と呼ばれる圧縮と加熱を分業で行うレーザー核融合方式において、従来方式とは全く異なる新しい加熱デザインを提供できるかもしれない。

そこで我々は、レーザーからイオンへの直接的かつ効率的なエネルギー変換機構を探索することを目的として研究を進めている。その中で発見した興味深い加熱機構が、定在ホイッスラー波の崩壊現象である。通常、プラズマ中を伝播するレーザー光には臨界密度が存在し、固体密度を越えるような高密度プラズマ中を伝播することはできない。しかし、非常に強い磁場が存在すると、この状況は一変する。もし、電子サイクロトロン振動数がレーザー光の振動数よりも大きくなると、磁力線に沿って進行する低振動数のホイッスラー波が、プラズマ中を伝播できるようになる。その場合、臨界密度という制限は存在せず、ホイッスラー波はどのような密度のプラズマに対しても侵入できる。そうなると、電磁波であるホ

イッスラー波と高密度プラズマが直接相互作用できることになり、従来考えられていなかった新しい物理機構によって、効率的なエネルギー変換や粒子加速現象が期待される[1-3]。また、この特性を利用することで、直線偏光のレーザー光を円偏光に変換するプラズマデバイスを設計することも可能である[4]。面白いことに、この機構が起こるための実効的なプラズマ条件は、高強度レーザープラズマや磁場閉じ込め核融合プラズマ、さらには惑星間プラズマと共通しているため、このプラズマ加熱機構は幅広い分野の応用研究に展開できる。

2. ホイッスラー波の伝播特性

高強度ガラスレーザーなどの波長 1 ミクロン程度のレーザー光の場合、ホイッスラー波が伝播するための臨界磁場強度は、およそ 10 キロテスラ (1 テスラは 1 万ガウス) に相当する。すなわち、この 10 キロテスラがレーザー・プラズマ相互作用に質的な違いをもたらす必要条件となる。近年、大阪大学の激光 XII 号レーザーなど世界中の大型レーザー実験によって、1 キロテスラ程度の強磁場の生成が数多く確認されている[5]。さらに、その 1000 倍である 1 メガテスラの発生も、数値シミュレーションによって既に予言されており、その実証実験が計画されている[6]。つまり、10 キロテスラを越える極限磁場の実験室利用が目前に迫っており、「高強度レーザーと超臨界高密度プラズマの直接相互作用」の現実味が急速に高まっている。

電磁波の振動数が与えられたとすると、臨界密度や臨界磁場強度が計算できる。臨界磁場強度の大きさは、電磁波の振動数に比例するため、レーザー波長には反比例することになる。つまり、波

長 10 ミクロンのレーザーに対してはホイッスラー波伝播に要求される磁場強度は 1 キロテスラに緩和される。したがって、レーザーを用いた原理実証実験には炭酸ガスレーザーの使用が魅力的かもしれない。また、無衝突近似が成り立つ範囲では、さらに波長の長い電磁波を考えることで、磁場核融合プラズマやさらには惑星磁気圏プラズマ、太陽風プラズマでも全く等価な現象が期待できる。

我々はプラズマ粒子コード (Particle-In-Cell; PIC) を用いた第一原理シミュレーションによって、高密度プラズマ中の大振幅ホイッスラー波の伝播過程を理論的に明らかにしてきた[1-4,7]。解析手法の特色としては、できるだけ簡潔な系を用いて現象の本質を抽出することで、複雑なプラズマ基礎過程を一つ一つ丁寧に理解していくことを目的としている。そして、高密度プラズマと電磁波との直接相互作用について広いパラメータ空間を網羅的に調べ上げることで、効率的なエネルギー吸収過程や粒子加速機構の最適化を達成させたいと考えている。

このイオン加熱現象は空間一次元速度三次元を考慮することで扱うことができる。真空中に一樣密度の高密度プラズマターゲットを初期にセットし、そこに円偏光レーザーを照射する系を考える。レーザー光の伝播方向に臨界磁場強度を超える外部磁場を印加しておく、照射されたレーザー光はホイッスラー波としてプラズマ中にもそのまま侵入できる。さらに定在波を発生させるために、レーザーはターゲットの両側から対向で照射する。ちなみに、直線偏光のレーザーを照射しても、その一部はホイッスラー波としてプラズマ中を伝播することが可能であるが、我々の解析では磁場の向きに対して右回り円偏光のレーザー光を最初から仮定して計算している。その時の電磁場の時間発展の様子を、図 1 に示している。このシンプルな系を特徴付ける無次元パラメータは、それぞれの臨界値で規格化されたプラズマ密度、外部磁場強度及びレーザー振幅の 3 つのみ

になる。定在波が発生しているターゲット中央部で、縦方向 (レーザー進行方向) の静電場が突如発生しているが、これがイオンを加速する力として働くことになる。

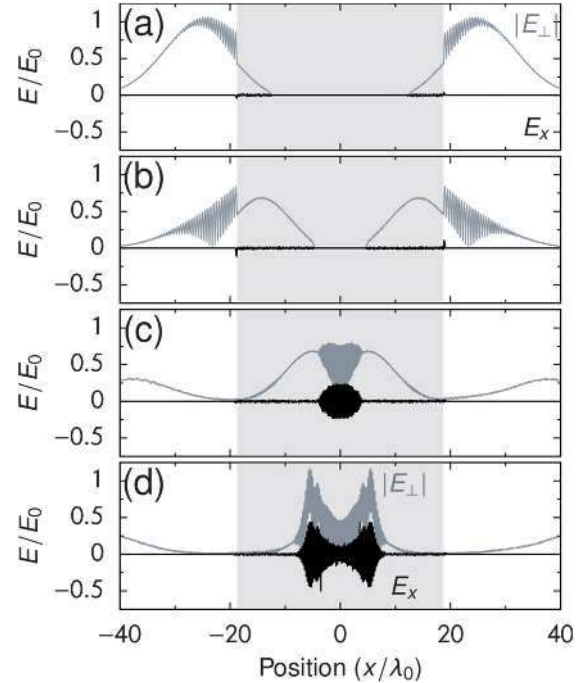


図 1: 対向ホイッスラー波と高密度プラズマターゲットとの相互作用の時間発展の PIC シミュレーション例。(a) から (d) に時間発展をしている。真空中に置かれたターゲットの両側から高強度レーザーを照射すると、その一部がホイッスラー波としてプラズマ中に侵入する (a, b)。プラズマ中心部で定在波が形成されると、縦電場が発生しプラズマ中のイオンの運動に大きな影響を与えることになる (c, d)。

3. 慣性核融合プラズマへの応用と加熱効率

定在ホイッスラー波加熱のレーザー核融合への応用を考えてみる。近年、レーザー核融合の点火デザインの中に外部磁場によるプラズマ制御の効果を取り入れる例は多く[8,9]、新しい研究展開の鍵となっている。例えば、磁場による界面流体不安定や熱伝導の抑制が検討されているが、我々の方法は、これらとは全く別の視点からの磁場の活用と言える。

ホイッスラー波を活用することで、磁場閉じ込

めとレーザー加熱を複合した、新しい「磁場閉じ込めレーザー核融合」という新展開が期待できるかもしれない。密度を固体密度以上に上げるためにレーザー爆縮をすることで、同時に外部印加磁場も増幅させることもできる。この時、磁気圧はガス圧よりも高くなっているため、磁場閉じ込めプラズマの状態に近い。その場面で、定在ホイッスラー波加熱を起こすことができれば、全く新しいデザインの核融合点火方式となりうる。また、この加熱機構では 100 keV を超える温度も実現可能なため、ターゲットとして水素・ホウ素反応を期待したアンモニアボランを使うことも面白いだろう。このような多種イオンを含むターゲットで定在ホイッスラー波加熱がどのように進行するのか、エネルギー利得が 1 を超える実験デザインは果たして可能か、などの疑問について整理してみたい。

核融合応用を考える際には、エネルギー利得が最も重要な指標となる。高利得のためにはプラズマの密度をできるだけ高くする必要がある。定在ホイッスラー加熱で達成されるイオン温度は図2に示されている。この図からは、もしレーザー強度が高ければ、たとえプラズマ密度が固体水素密度よりも高くても 10 keV を超えるような核融合プラズマが形成されることが示唆されている。そこで、別のレーザーによって爆縮された状態の重水素-三重水素 (DT) プラズマをターゲットとして考えてみる。我々の考える系では様な強磁場が不可欠な要素のため、磁場に直交する方向への円柱形状の爆縮と相性がいいだろう。例えば、固体密度の 30 倍の圧縮を想定してみる。この場合、イオン温度 40 keV にするために必要なレーザー強度は $I_0 = 1.09 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$ 程度となった。また、高いエネルギー変換効率の実現のためには、屈折率はできるだけ 1 に近い必要があるため、外部磁場強度としては $B_{\text{ext}} = 2.14$ メガテスラを仮定している。加熱領域はホイッスラー波のパルス長で決まるが、ここではレーザー周期の 200 倍、すなわち 106 fs としている。この場合のイオン温度の理

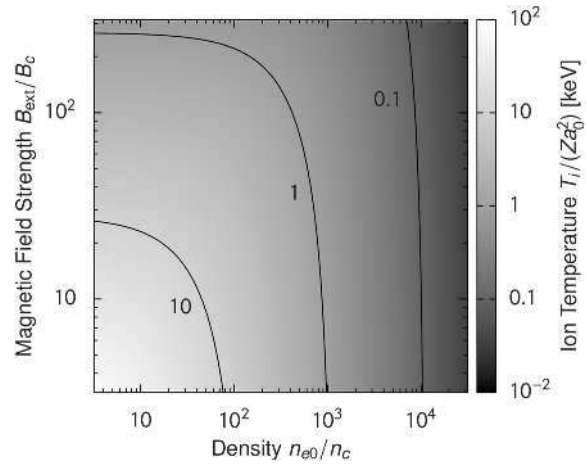


図2：定在ホイッスラー波加熱によって達成できるイオン温度のパラメータ依存性。最終的な温度は、3つのパラメータ(密度、磁場強度、レーザー強度)で予測可能である。プラズマ密度と外部磁場強度が与えられた時の最大イオン温度をグレースケールで示しているが、温度はレーザー強度で規格化した値で示していることに注意して欲しい。

論予測値は約 140 keV である。このシミュレーションでは、爆縮された DT コアプラズマのイオン温度を 40 keV まで加熱することに成功できた。

この時のエネルギー利得を概算してみると、 $G \sim 2.5$ となる。また、定在ホイッスラー波加熱は高密度コアプラズマの中心部でのみ起こすことができるため、膨張速度が抑制され核融合反応をより長い時間持続させることができる[3]。もちろん $G \sim 1$ は、まだ発電炉としては不十分である。さらなる高利得のためには、高密度圧縮が不可欠という結論になる。また、この利得計算には爆縮レーザーの寄与は考慮されていない。もし爆縮レーザーのエネルギーが加熱レーザーと比べて無視できれば、上の見積もりは妥当となる。しかし、仮定した 2 メガテスラに対抗して爆縮を実現するには相当のエネルギーを要することになる。これは大きな課題になることは間違いないが、自己生成磁場を理想的な構造に制御しながら爆縮・加熱を進めるデザイン設計が可能かどうか、さらに検討することは興味深いと感じている。

4. まとめと今後の課題

レーザープラズマを用いてキロテスラを超える強磁場を発生・制御することができるようになってきた。このような強磁場を応用した実験を検討するためには、強磁場中におけるレーザー・プラズマ相互作用という基礎過程を理解する必要がある。もちろん磁化プラズマ中の電磁波の特性は数多く研究されてきているが、相対論的強度のレーザーとの相互作用など、まだまだ面白い問題が残されている状況である。我々は対向ホイッスラー波のつくる定在波を活用した、臨界密度を超える高密度プラズマ中での効率的なイオン加熱過程を発見した。この機構の最も重要な特徴は、電磁波のエネルギーが電子を介することなく直接イオンに輸送されることである。この利点を生かして、レーザー駆動慣性核融合の新しいプラズマ加熱機構としての有用性を検討している。簡単な数値シミュレーションの結果から、爆縮された高密度DT燃料プラズマにホイッスラー波を照射することで数 10 keV を超えるようなイオン温度の実現が確認されている。さらに、水素とボロンを含むターゲットを熱的な pB 核融合反応が可能な数 100 keV に加熱することも原理的に可能であることも示した。今後は、将来的に実験可能なより現実的なシステムデザインの構築や、実験を模擬するような多次元幾何学構造の元での加熱実現性などを調べるのが理論シミュレーションの課題になるであろう。

我々のイオン加熱機構に必要な実効的な磁場の強度は、ホイッスラー波の波長に依存する。高強度レーザーを想定した波長 1 ミクロンで 100 キロテスラに相当する磁場は、波長 1 センチメートルでは 1 テスラとなる。ITER などのトカマクプラズマで使われる 5 テスラの磁場を利用して、磁力線に沿った方向にホイッスラー波を励起できれば、磁場閉じ込め核融合プラズマのイオンを加熱できるかもしれない。また、惑星磁気圏で観測される波長 100 km を超えるホイッスラー波と、ナノテスラの惑星間磁場でも相似的な現象が十

分に起こりうる。これらの例だけに留まらず、パルサーなどのコンパクト天体周辺における輻射とプラズマの相互作用への応用なども可能であると考えており、「強磁場中での波動粒子相互作用」をキーワードにした学際的な展開を積極的に進めていきたい。

参考文献

- [1] T. Sano et al., Phys. Rev. E, 96, 043209 (2017).
- [2] T. Sano et al., Phys. Rev. E, 100, 053205 (2019).
- [3] T. Sano et al., Phys. Rev. E, 101, 013206 (2020).
- [4] T. Sano et al., Phys. Rev. E, 102, 053214 (2020).
- [5] S. Fujioka et al., Sci. Rep., 3, 1170 (2013).
- [6] M. Murakami et al., Sci. Rep., 10, 1 (2020).
- [7] M. Hata et al., Phys. Rev. E, 104, 035205 (2021).
- [8] S. Fujioka et al., Phys. Plasmas, 23, 056308 (2016).
- [9] S. Sakata et al., Nat. Commun., 9, 3937 (2018).