

高強度レーザーを用いた高密度プラズマのホイッスラー波加熱 Plasma Heating by Whistler Waves Generated by Intense Lasers

佐野孝好

Takayoshi Sano

大阪大学

Osaka University

1 背景

レーザーなどの電磁波を用いて高密度プラズマ中のイオンを高温に加熱することは、核融合研究などの実験室プラズマにおいて非常に重要かつ困難な課題である。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に入っていくことはできない。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、磁力線方向に伝播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, 2, 3]。

高強度ガラスレーザーなどで用いられる波長 1 ミクロン程度のレーザー光の場合、この臨界磁場強度は、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。さらに、その 100 倍である 100 キロテスラの発生も、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。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。

2 ホイッスラー波によるプラズマ加熱機構

ホイッスラー波は右回り円偏光電磁波であり、電子とサイクロトロン共鳴を起こすことが知られている。レーザー強度が高い場合には、レーザー電場によって

電子は相対論的速度にまで容易に加速されるため、サイクロトロン共鳴にも相対論効果を考慮する必要がある。実際、相対論効果で電子質量が実効的に重くなることで、磁場強度に関する共鳴条件範囲が拡大し、電子が加速されやすくなる [1]。

核融合研究では、最終的にイオンを高温に加熱する必要がある。したがって、ホイッスラー波との直接相互作用の恩恵を、イオンのみが享受できる状況が理想的である。核融合反応を地上で実現させるためには、高密度プラズマを太陽中心と同程度まで高温に加熱しなければならない。大型レーザー装置を用いた核融合の場合、高強度レーザーのエネルギーをプラズマに吸収させて加熱を行う。しかし、通常は質量の軽い電子に大部分のレーザーエネルギーが輸送され、イオンはなかなか加熱されない。この困難を回避するためにも、レーザーからイオンに直接エネルギー変換する物理過程が切望されているが、効率の良い機構は見つかっていなかった。

この問題を解決する鍵となる物理機構として、我々は、ホイッスラー波の定在波が持つ興味深い性質に着目している [2, 3]。ここで、我々の注目する定在ホイッスラー波からイオンへの直接的なエネルギー変換過程を簡単に説明しておく。

ホイッスラー波が外部磁場に沿って高密度プラズマ中を伝播する際、磁力線に沿った方向には、電子が電磁場から力を受けない。一方、対向照射されたホイッスラー波が重なることで定在波が発生すると、磁力線方向の $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 項によるローレンツ力が有限な値をもつことになる (図 1a 参照)。この力は、ホイッスラー波のちょうど半分の波長で周期的な構造をもち、時間的に定常であるという特徴をもつ。この時、電子は周期的な密度粗密を形成することで、磁力線方向の縦電場を発生させ、力の釣り合いを取るようになる (図 1a, 図 2)。

次に、この時のイオンの運動を考えてみる (図 1b)。速度の遅いイオンにとっては $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 項による力は無

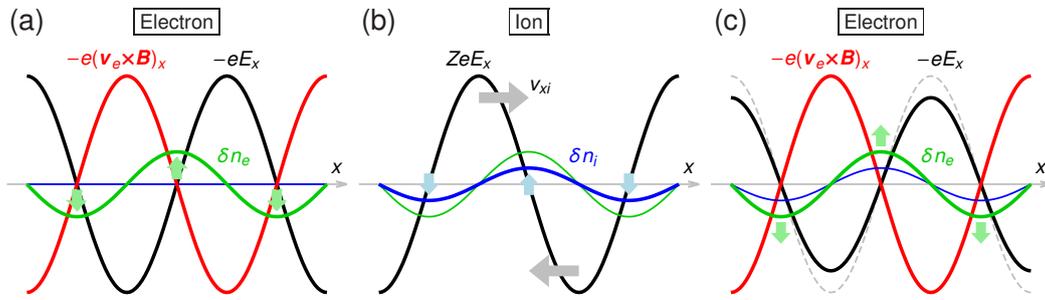


Fig. 1: 定在ホイッスラー波によるイオンの加速機構を模式的に示している。(a) 電子密度の粗密ができることで定常的な電場 E_x が発生し、(b) その電場でイオンが加速される。(c) この機構には正のフィードバックが働いているため、イオン波の速度振幅は時間に比例して増大し続ける。

視できるため、磁力線方向の縦電場による力のみを感じて、静電的なイオン音波として加速される。これによって、イオンの密度分布はこの縦電場を打ち消す方向に変化するが、すぐにまた電子が移動することで、縦電場の値は一定に保たれる (図 1c)。したがって、一連のこのプロセスには、正のフィードバックが働くことになり、イオンの加速は定在波が存在する限り定常的に続くことになる。ホイッスラー波の振幅が相対論的な強度に近づいてくると、この加速電場は TV/m に達し、電磁波の振動周期の数倍程度の時間で、イオン音波の速度振幅は光速の 1% 程度まで一気に加速される。このイオン音波がプラズマ不安定などによって熱化すれば、その温度は 100keV にも達する。すなわち、高密度の核融合プラズマが形成されるのである。

3 応用展開

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円柱形状の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。ターゲットとしては水素・ホウ素反応を期待したアンモニアボラン (H_6BN) を使うことも検討している。

また、地球近傍の惑星間空間でホイッスラー波が観測されている。太陽から遠方の領域で太陽風プラズマを高温に維持する機構は未解明であるが、このホイッスラー波同士が相互作用することで、プラズマ加熱に寄与できるかもしれない。レーザー駆動のホイッスラー波と異なり、自然界ではそれぞれのホイッスラー波の振動数は必ずしも同じにはならない。異なる振動数のホイッスラー波が対向ですれ違う際に、定在ホ

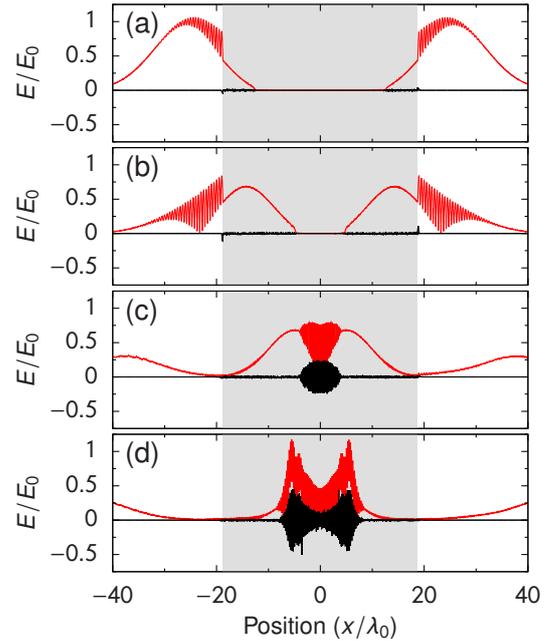


Fig. 2: 対向ホイッスラー波とプラズマとの相互作用の時間発展の例。中央に置かれたプラズマの両側から高強度レーザーを照射すると、その一部がホイッスラー波としてプラズマ中に侵入する (a,b)。プラズマ中央で定在波が形成されると、縦電場が発生しプラズマの運動に大きな影響を与えることになる (c,d)。

ィッスラー波加熱と類似の現象を起こせるかどうかは興味深い問題である。

これらの例だけに留まらず、磁場核融合プラズマなどの実験室プラズマや、パルサーなどのコンパクト天体周辺でも類似の現象が起こると考えており、ホイッスラー波をキーワードに学際的な研究展開を推進していきたいと考えている。

References

- [1] T. Sano, Y. Tanaka, N. Iwata, M. Hata, K. Mima, M. Murakami, and Y. Sentoku. *Phys. Rev. E*, 96:043209, 2017.
- [2] T. Sano, M. Hata, D. Kawahito, K. Mima, and Y. Sentoku. *Phys. Rev. E*, 100:053205, 2019.
- [3] T. Sano, S. Fujioka, Y. Mori, K. Mima, and Y. Sentoku. *Phys. Rev. E*, 101:013206, 2020.