

## 乱流加熱の普遍性を調べる位相空間計測実験

## Experimental study on universality in turbulence heating in magnetized plasma by phase-space diagnostics

河森栄一郎、林彥廷<sup>(a)</sup> [KAWAMORI Eiichirou and LIN Yu-ting]台湾國立成功大學ISAPS <sup>(a)</sup>現所属:東大新領域) [ISAPS/National Cheng Kung Univ.]

温度約6,000Kの太陽光球に隣接する太陽コロナが、磁化プラズマ乱流によりどのように100 eVまで加熱されるのか、磁化プラズマ乱流により太陽風がどのように加熱・加速されるのか、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける乱流のエントロピーパラドックス等は、磁化プラズマ乱流の加熱問題として知られる。例えば太陽コロナの乱流加熱の具体的な疑問は、乱流駆動源であるアルベン波/運動論的アルベン波が、どのような過程(共鳴、線形位相混合、ランダウ減衰、衝撃波散逸、その他)を経てエネルギー散逸(すなわち加熱)を引き起こすのかというものである。簡単にいえば乱流加熱問題とは、イオンがどのスケールで加速され、どのスケールで散逸されるか、そのスケール間をエネルギーがどのように輸送されるかという問題である。

太陽コロナ、太陽風および磁場閉じ込め核融合プラズマは無衝突(正確にはweakly collisional)プラズマであり、そのダイナミクスはVlasov-Fokker-Planck-Maxwell方程式で記述される。ボルツマンのH定理によれば、エントロピー生成(加熱)は粒子間衝突によってのみ引き起こされる。Fokker-Planck方程式において衝突項は速度空間での摩擦と拡散で記述されるため、weakly collisional プラズマでは $\partial f/\partial v$ もしくは $\partial^2 f/\partial v^2$ が大きな値をとるときにエントロピー生成が起こる。ここで、 $f$  及び $\mathbf{v}$ は各々イオン速度分布関数及びイオン速度ベクトル。言い換えると、速度空間に微小スケール構造が作られたときに加熱が生じるということである。加えて、衝突が支配的な空間スケールはイオンのジャイロスケールよりも遥かに小さなスケールである[1]。他方、乱流におけるエネルギー注入は通常マクロスコピックなスケールで行われる。これらの事実は磁化プラズマ乱流におけるエネルギー輸送の描像が、マクロスケールで注入されたエネルギーがエントロピーの形(厳密には自由エネルギー $F = E - TS$ の形。E:内部エネルギー、T:温度、S:エントロピー)で実空間および速度空間において小スケールにカスケードし、散逸されるというものであろうことを示唆する。この

描像はエントロピーカスケードとよばれ、 $k_{\perp} \rho_i \geq 1$ であるスケールではジャイロ運動論を用いて説明されている。ここで $k_{\perp}$ 及び $\rho_i$ は各々、乱流揺動の磁力線に垂直方向成分の波数及びイオンの熱速度におけるジャイロ半径。エントロピーカスケードは、ジャイロスケールにおいては空間2次元、3次元、静電乱流、電磁乱流を問わず生じ、磁化プラズマ乱流のユニバーサルな性質であろうと考えられている。エントロピーカスケードはイオンの位相空間でのダイナミクスであることから、その同定には位相空間の計測が必要である。本研究では、実験室2次元磁化プラズマ静電乱流においてリング平均イオン速度分布関数をRing-averaged ion distribution function probe [2]を用いて計測し、初めてギブスエントロピーの位相空間分布を実際の磁化プラズマで求めた。実験では、乱流を駆動するドリフト波の $k_{\perp}$ を $k_{\perp} \rho_i \sim 0-10$ の間で制御したドリフト波乱流に対しギブスエントロピーの位相空間分布を計測した。この計測により、エントロピーと静電揺動エネルギーの慣性小領域が位相空間に存在し、エントロピーの順カスケード、静電揺動エネルギーの逆カスケードを伴うデュアルカスケードが位相空間で非線形位相混合により生じていることなどを同定している [3]。

## References:

1. Schekochihin, A. A., Cowley, S. C., Dorland, W., Hammett, G. W., Howes, G. G., Plunk, G. G., Quataert, E. & Tatsuno, T. Gyrokinetic turbulence: a nonlinear route to dissipation through phase space. *Plasma Phys. Control. Fusion* **50**, 124024 (2008).
2. Kawamori, E., Chen, J., Lin, C. & Lee, Z. "Ring-averaged ion velocity distribution function probe for laboratory magnetized plasma experiment" *Review of Scientific Instruments* **88**, 103507 (2017).
3. Eiichirou Kawamori & Yu-Ting Lin, "Evidence of entropy cascade in collisionless magnetized plasma turbulence". *accepted for publication in Communications Physics*