

ピックアップイオンの加速機構の研究

Investigation of the acceleration of interplanetary pickup ions

研究代表者：坪内 健 (電気通信大学)
kent1@mac.com

研究目的 (Research Objective):

太陽風プラズマは星間プラズマを押し広げて太陽圏を形成するが、超音速で衝突する反動で太陽風側に終端衝撃波 (TS) が伝播する。TS と太陽圏の境界面 (HP) に挟まれた領域 (HS) は TS で減速・加熱を受けた太陽風プラズマで占められている。太陽圏の形状や大きさといった構造は HP における圧力平衡によって決まるため、HS 内のエネルギー分布を定量的に把握することが必須となる。TS におけるプラズマの加熱過程に対し、その供給源である太陽風の各種パラメータへの依存性を数値シミュレーションで検証することによって、HS 内プラズマの物理的特性を解き明かすのが本研究の目的である。

対象となる太陽圏外縁領域特有のプラズマ環境として、ピックアップイオン (以下 PUI) のダイナミクスに特に着目する。星間中性粒子が太陽風プラズマとの電荷交換によってイオン化した結果太陽風磁場に捕捉される PUI は、その実効熱エネルギーが数 keV に達する。これは数 eV 程度である背景の太陽風イオンに比べて衝撃波での加熱をより効率的に受けられることから、HS 内におけるエネルギー密度の主成分となる。更にその速度分布の特性により、PUI として生成される太陽風中で既に不安定性を励起して太陽風自体の加熱や乱流生成の効果などももたらし、ひいては TS での加熱過程においても修正が加えられる。本年度は衝撃波上流の太陽風で成長する電磁場擾乱と PUI 密度との関連性について解析を進めた。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究で行う数値シミュレーションでは、イオンを個別粒子としてその運動方程式を解き進め、電子は電荷中性を満たす質量ゼロの流体として扱い、密度や電流といった流体量を数値グリッド上に与えて Maxwell 方程式に適用して電磁場を解く 1 次元ハイブリッドコードを用いた。PUI を含む太陽風プラズマと星間プラズマを直接衝突させる 1 次元衝撃波管モデルの初期状態では、星間プラズマと太陽風プラズマを密度比 10 の不連続面を介して一様に配置し、PUI は太陽風領域にのみ、太陽風系の速度空間内で太陽風速度を半径とする球殻状の分布を持つように与えた。磁場をシミュレーション空間 (x 軸) に対して垂直方向 (y 軸) に与えることで、TS は垂直衝撃波として形成される。太陽風プラズマをアルフベン速度の 10.7 倍の速度でシミュレーション空間内に常時注入することで、星間プラズマとの境界からの反動として太陽風側・星間空間側にそれぞれ衝撃波が伝播し、TS、HP 双方の形成が self-consistent に再現さ

れる。空間を 0.5 プロトン慣性長×10 万グリッド、時間を 0.06 ジャイロ周期×40 万ステップに取り、これは典型的な太陽風パラメータを適用するとそれぞれ 2.8 天文単位、309 時間に相当する。PUI 密度は背景太陽風に対して 0, 1, 5, 10, 20, 25%と変えながらそれぞれ計算を行った。

研究成果 (Accomplishments) :

背景太陽風のプラズマ圧を Fig.1 に示す。図の中心の不連続面が TS を表す (右端の不連続が HP)。線色はそれぞれ PUI 相対密度が 1% (黒) 5% (青) 10% (橙) 20% (緑) 25% (赤) の場合となる。図より PUI 密度の増加に伴い、HS の拡大と TS における圧縮率の低下が認められる。ここでは更に上流の太陽風領域において、PUI 密度の増加に応じてプラズマ圧自体も上昇していることに着目する。この計算では 1 セルあたりの粒子数を 50 個としたが、その少なさ由来の統計的な揺らぎから非物理的な電磁波動が成長して粒子を加熱したと当初は考えた。

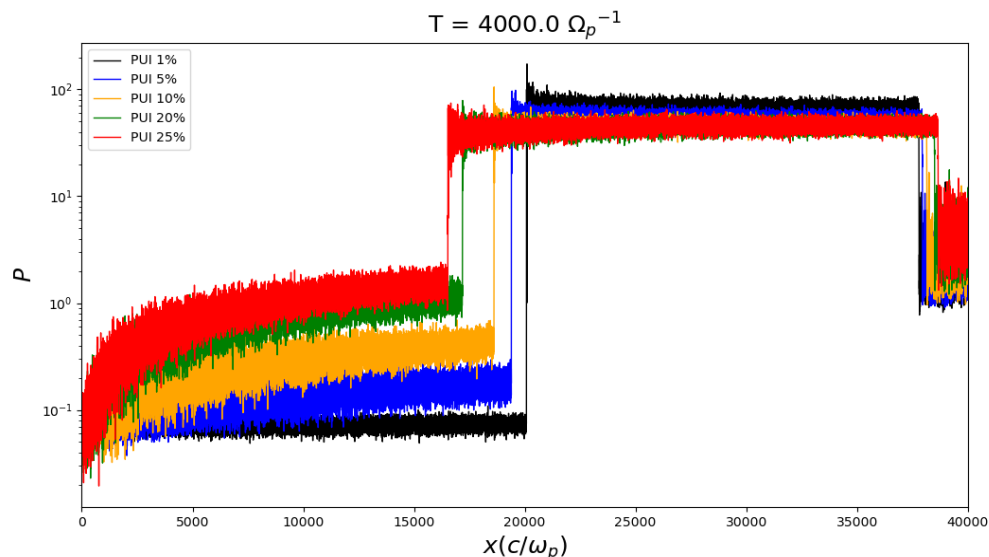


Fig.1 太陽風プロトン圧の空間プロファイル

そこで 1 セルあたりの粒子数を 1000, 5000, 10000 個と増やして同様の計算を実行したところ、やはり同じように太陽風が加熱されていたことから、これが物理的な現象であると結論付けた。Fig.2 には、PUI 密度 25% の TS 上流域における電場の x 成分に対する Fourier 成分の時間発展の様子を、1 セルあたりの粒子数が 50, 1000, 5000, 10000 個の場合についてそれぞれ示す。1 セルあたり 50 個の場合は全波数領域にノイズが広がっているため非物理的な現象と捉えられるが、初期ノイズが抑制されている 1000 個以上の場合は、時刻が $20 \Omega_p^{-1}$ を超えたあたりから特定の波数モードが成長していることが確認できる。高調波成分も見られることからイオンバーンスタイン波 (IBW) と考えられる。PUI の初期速度分布がリング形状 (磁場垂直方向に太陽風速度相当の半径を持つ分布) の場合には既に IBW の成長が立証されてい

た。安定とされる球殻形状でも長時間経過すれば IBW による加熱が生じる本研究の結果は、PUI 密度が 25%程度と予想されている太陽圏外縁領域において TS でのプラズマ圧縮を定量的に評価する際も、上流での事前加熱の効果などを考慮して理論を再構築する必要性を示唆するものとなった。

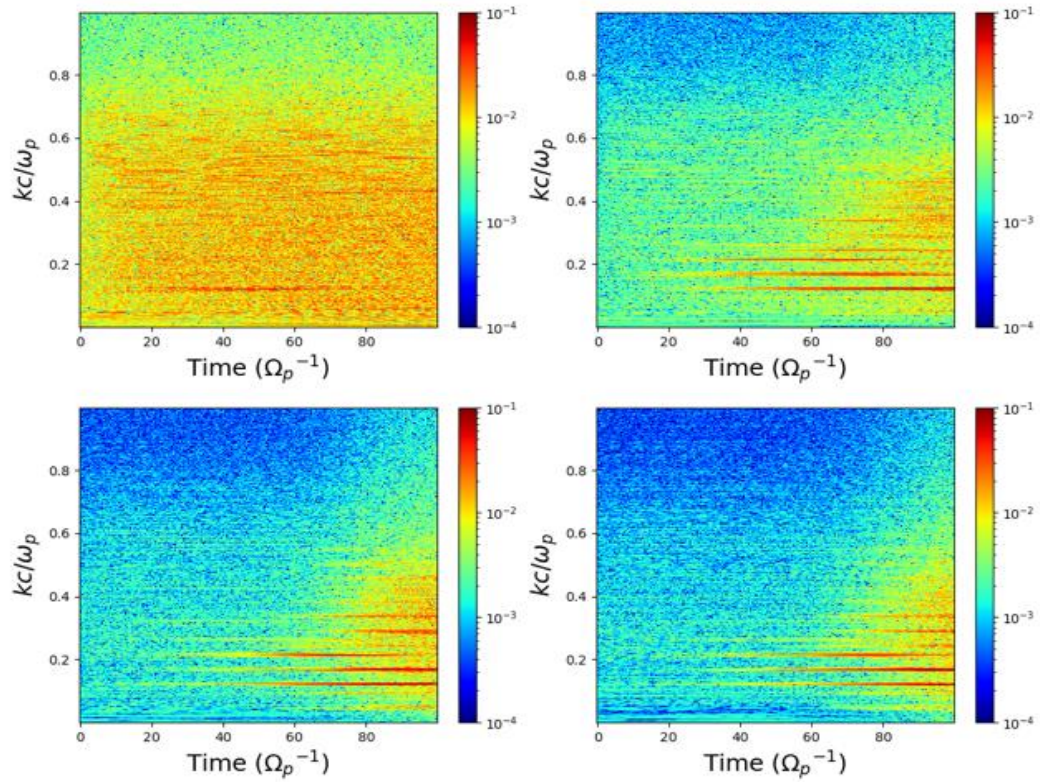


Fig. 2 TS 上流における電場 E_x の Fourier 成分の時間発展 (1セルあたり粒子数 (左上) 50 個、(右上) 1000 個、(左下) 5000 個、(右下) 10000 個)