

ピックアップイオン加速機構の研究

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):

太陽風が星間プラズマと接する太陽圏外縁部では、星間中性粒子が太陽風プラズマとの電荷交換で帯電したピックアップイオン (pickup ion、以下 PUI) のプラズマ中に占める割合が 2 割を超えることが最近の探査機観測から見積もられている。PUI の磁場旋回速度は背景の太陽風速度に相当するため、実効的な熱エネルギーが背景プラズマに対し 2-3 桁高くなる。その結果、終端衝撃波 (termination shock、以下 TS) から太陽圏界面 (heliopause、以下 HP) に至る領域 (heliosheath、以下 HS) ではエネルギー密度の大半を PUI が担うことになる。HS におけるプラズマ環境を定量的に確定する上で太陽風プラズマと PUI のエネルギー配分率は本質的に重要なパラメータであり、そのためには太陽圏内で生成される PUI が TS 通過時に受ける加速・加熱プロセスを明らかにする必要がある。本年度は前年に引き続いて HS 内粒子のエネルギー分布および HS 空間スケールの PUI 密度への依存性について検証し、衝撃波における Rankine-Hugoniot の関係式からプラズマの比熱比を求めて、HS のプラズマ特性に関する理解を深める。

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) :

これまでに PUI 密度の増加に伴って TS での圧縮率が低下した結果、HS の厚みが拡大することを確認したが、改めてこれを Fig. (左) に示す。太陽圏側で HS の厚みが TS における圧縮率 Γ に対し $\Gamma^{-1.49}$ の関係で近似できるが、これは太陽風流量が一定の下での保存則の要請以上に拡大している。実際の HP 近傍ではプラズマの流れが脇に逸れる効果加わるため、基本的には HS 内のプラズマの総量が変わらないことで PUI 密度と HS の厚みの関係が説明可能である。

また HS における PUI のエネルギー分布からは、10keV を超える suprathermal 成分の生成が PUI 密度にはほとんど依存していない一方で、比熱比には顕著な違いが確認された。Fig. (右) には TS での断熱加熱を仮定したときの PUI の比熱比と PUI 相対密度との関係を示す。図に示すように比熱比は PUI 密度が高くなるほど等方的な分布を取ることがわかる。背景の太陽風自体、通常適用される 5/3 より高い値を示し、太陽圏外縁部で観測的に示唆されていることと整合する。衝撃波の圧縮率などは比熱比に強く依存することから、太陽圏構造を電磁流体モデルで構築する上でも比熱比の正確な評価が必須である。今後は PUI の生成プロセスも考慮した、より現実的なシミュレーションモデルを用いて、HS 内のプラズマの熱力学的特性を定量的に明らかにし、太陽圏外縁部の比熱比の導出に活用することを計画している。

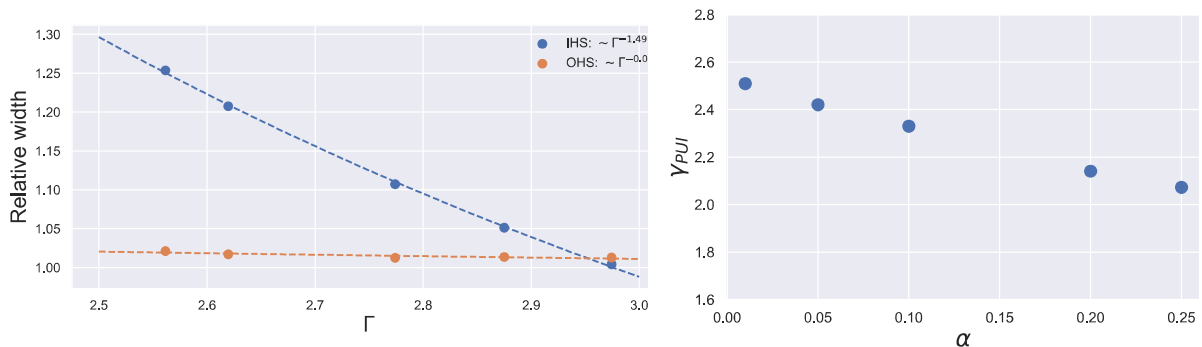


Fig. (左) TS における圧縮率と HS (IHS: 太陽圏側、OHS: 星間空間側) の厚み (PUI を含まない場合との比) の関係。(右) PUI の相対密度と TS における PUI の比熱比との関係。

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. 坪内 健、Properties of the heliosheath plasma associated with the compression at the termination shock、第 152 回地球電磁気・地球惑星圏学会、相模原、2022 年 11 月