

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：研究代表者名 坪内 健（電気通信大学）

研究目的 (Research Objective):

太陽風は星間プラズマとの衝突によって膨張が遮られ、太陽圏と呼ぶ閉じた空間を形成する。その接触面 (heliopause; HP) から太陽圏側には衝撃波 (終端衝撃波; TS) が伝わり、超音速の太陽風はそこで減速・加熱される。この減速・加熱を受けたプラズマで占められた領域が (内側) ヘリオシース (IHS) と呼ばれ、太陽圏全体を包みこんでいる。TS におけるプラズマ加速・加熱の物理を解明することが、IHS の熱的環境を定量化する上で本質的に重要である。TS 特有のプラズマ加熱過程と太陽風パラメータとの関連性について、数値シミュレーションの手法を用いて検証することが本研究の目的となる。

TS 特有のプラズマ環境として着目するのがピックアップイオン (PUI) のダイナミクスである。その生成過程の特質から、PUI は背景太陽風と比べて遥かに (2～3 桁) 高い実効的な熱エネルギーを持つ。New Horizons の PUI 観測結果を外挿すると TS 領域の PUI 密度は 25%程度と見積もられ、またボイジャーの観測から太陽風プラズマの TS における加熱が弱く、圧縮率 (上下流の密度比) も Rankine-Hugoniot 関係からの予測より低いことが確認されている。いずれも TS-IHS 領域では PUI がエネルギー密度の大半を取得していることを示唆している。この環境における IHS でのエネルギー配分を明確にする上で、本年度は衝撃波圧縮で決定される下流プラズマ圧の特性について、Rankine-Hugoniot 関係に基づく理論と数値計算の整合性の検証を進めた。

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。衝撃波上流側で太陽風、PUI とともに圧力は等方的に与えられる。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。アルフベンマッハ数 $M_A = 10.7/5.0$ の太陽風プラズマを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

れ衝撃波が伝播し、TS、HP 双方の形成が self-consistent に再現される。PUI 密度は背景太陽風に対して 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25%と変えながらそれぞれ計算を行った。

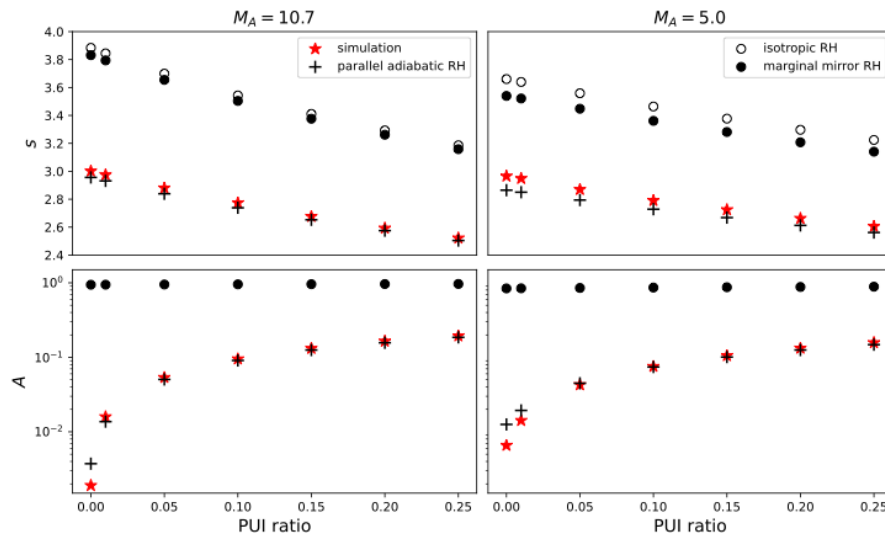


Fig.1 PUI 密度比に対する TS の圧縮率（上）および異方性パラメータ（下）の関係。左が高速太陽風 ($M_A = 10.7$) の場合で右が低速太陽風 ($M_A = 5.0$) の結果を示す。星印、白丸、十字、黒丸がそれぞれシミュレーション結果、等方 RH の解、圧力の磁場平行成分の断熱性を仮定した非等方 RH の解、ミラー不安定の閾値における非等方 RH の解を表す。

研究成果 (Accomplishments) :

衝撃波上下流のマクロな物理量は理論的には MHD Rankine-Hugoniot (RH) の関係で接続されるが、特に今回対象とする垂直衝撃波 (磁場が衝撃波法線方向に対して垂直) では圧力非等方性を含む形に RH を修正する必要がある。但しその場合、通常 RH では変数が不足するため、方程式系を閉じるために 2 種類の制限を導入して上流のパラメータ (アルフベンマッハ数 M_A 、プラズマ β) に対する下流の解を求める式に整理した。一つはプラズマ圧の磁場平行成分の断熱性を仮定するもの (closure 1) で、もう一つはミラー不安定の閾値条件を課すもの (closure 2) である。これらから得られる圧縮率 s 、および下流プラズマ圧の異方性パラメータ ($A \equiv P_{\parallel}/P_{\perp}$) について、シミュレーション結果と比較した。

シミュレーションでは衝撃波が定常状態になった時点で上下流の物理量の平均値を取り、太陽風と PUI を単一流体とみなして算出した s, A および、衝撃波上流側の M_A, β を RH の式に代入して求めた解を Fig.1 に示す。シミュレーションではまず、PUI 密度が増すほど圧縮率は低下し異方性は小さくなることが確認できる。圧縮率の低下は Voyager の観測でも示された通りマッハ数の低下によるものであり、またプラズマ圧の異方性は太陽風がより顕著に反応するため PUI 密度が低いときには総異方性が強まるのに対し、高 PUI 密度では衝撃波で散逸されたエネルギーの大半が PUI に分配されることから異方性が弱まっている。RH の解との比較では、closure 1 を適用した解

とほぼ一致した結果となり、等方性を仮定した通常の RH および closure 2 を適用した RH の解と比べて圧縮率は低く、異方性はより強くなっていることがわかる。一方、closure 2 の解は通常の RH の解に近く、圧力もほぼ等方的になっている。今回の状況（高 β 、垂直衝撃波）では実際にはミラー不安定が成長して異方性が緩和されていくはずだが、1 次元のシミュレーションでは不安定性の成長が抑制されることで異方性が緩和されることなく下流に残り続けることで closure 1 の解に整合している。また PUI を含んだ非 Maxwellian プラズマにおいてもマクロな物理量の関係である RH が成立していることも示された。

ここで着目したいのが、ミラー不安定は衝撃波圧縮と直接関連付けられるものではなく、まず衝撃波によって異方性が生成され、これが不安定性の駆動源になっていることである。衝撃波によるプラズマ圧縮過程は、異方性の生成→不安定による緩和→定常状態という多段階に渡ることを踏まえると、本研究は不安定性を抑制したことで初期段階の異方性を定量的に決定できたと言える。この成果からは、IHS でのミラー不安定の成長率や生成される magnetic hole などの磁場構造を上流のパラメータを用いて定量的に評価することを可能にし、グローバルな MHD モデリングを行う上でも適切な境界条件の設定などに適応されることが期待できる。

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. K. Tsubouchi, Rankine-Hugoniot equations in anisotropic plasmas: Application to the heliospheric termination shock, 第 158 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 神戸, 2025 年 11 月