

膨張する太陽近傍太陽風中の Alfvén 波パラメトリック崩壊不安定の動径発展：温度異方性の役割

#佐口 隼斗¹⁾, 川面 洋平²⁾, 庄田 宗人³⁾, 加藤 雄人¹⁾

(¹ 東北大大学院理学研究科地球物理学専攻, ² 宇都宮大学データサイエンス経営学部, ³ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

Radial evolution of Alfvén wave Parametric Decay Instability in the expanding near-sun solar wind: Role of Temperature Anisotropy

#Hayato Saguchi¹⁾, Yohei KAWAZURA²⁾, Munehito SHODA³⁾, Yuto KATOH¹⁾

(¹ Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku university, ² Department of Data Science and Management, Utsunomiya University, ³ Department of Earth and Planetary Science, School of Science, The University of Tokyo

Understanding the heating of the solar corona and the acceleration of the solar wind remains a central problem in solar physics. In the Alfvénic turbulence framework, nonlinear interactions among Alfvén waves generate turbulence and convert wave energy into heat, explaining coronal heating and solar wind acceleration. However, reduced MHD simulations that exclude compressive modes have sometimes failed to reproduce sufficient heating [e.g., Perez and Chandran 2013], motivating interest in the parametric decay instability (PDI) as a complementary mechanism [Shoda et al. 2018, 2019]. PDI causes a large-amplitude, circularly polarized Alfvén wave to decay into a backward Alfvén wave and a slow magnetoacoustic wave, thereby promoting turbulence and generating density fluctuations. Although some observational evidence of PDI has been reported [e.g., Bowen et al. 2018], the influence of temperature anisotropy on its growth rate and radial evolution is not investigated in detail. We compare the radial dependence of the maximum growth rate from 1.1 to 30 Rs (solar radii) using two dispersion relations: the classical isotropic MHD form [Goldstein 1978; Derby 1978] and an anisotropic MHD (CGL equations) that explicitly includes temperature anisotropy [Tenerani et al. 2017]. We prescribe radial profiles of plasma beta (beta), the normalized parent-wave transverse amplitude, and the anisotropy ratio, and we consider two expansion scenarios: (i) adiabatic expansion and (ii) an observation-based expansion. In the adiabatic case, the isotropic model yields a growth rate that increases with heliocentric distance, whereas the anisotropic model shows a decrease with distance. Under observation-based conditions, the anisotropic model tends to yield larger growth rates than the isotropic model due to perpendicular-temperature-dominated anisotropy; moreover, in both models, the growth rate peaks near $R \approx 3Rs$ and then suppresses rapidly. In the case with a squared normalized parent-wave amplitude of 0.01 at the corona, a difference of approximately 0.05 ω_0 between the anisotropic and isotropic models' maximum growth rates was observed from 3 to 8 Rs. These behaviors depart from isotropic predictions and demonstrate that temperature anisotropy strongly modulates PDI effectiveness. These results underscore the need for theoretical models that include anisotropy to advance our understanding of how PDI contributes to the generation of density fluctuation and turbulent heating. Combined with recent multi-spacecraft observations, our findings offer new guidance for identifying PDI in situ and refining physics-based models of solar wind formation.

太陽コロナから太陽風へと至る過程での加熱・加速機構の解明は、太陽物理学における中心的課題の一つである。近年注目されている Alfvén 乱流モデルでは、Alfvén 波どうしの相互作用により乱流が形成され、波動のエネルギーがエネルギー・カスケードを介して熱へと変換されることでコロナ加熱や太陽風加速が説明されてきた。しかし、圧縮性がない Reduced MHD シミュレーションでは十分な加熱量を再現できないという報告もあり [e.g., Perez and Chandran 2013]、その補完的役割としてパラメトリック崩壊不安定性 (Parametric Decay Instability: PDI) の寄与が提案されている [Shoda et al. 2018, 2019]。PDI は大振幅の円偏波 Alfvén 波が崩壊し、逆向きの Alfvén 波とスロー磁気音波を生成する不安定性であり、乱流形成や密度擾乱の生成に関与すると考えられている。近年の観測でも PDI の観測的兆候が報告されつつあるが [e.g., Bowen et al. 2018]、成長率や動径発展における太陽近くでの温度異方性の影響は十分に理解されていない。本研究では、従来の等方的な MHD から導かれる分散関係式 [Goldstein 1978, Derby 1978] に加え、温度異方性を考慮した MHD である CGL 方程式から得られる分散関係式 [Tenerani et al. 2017] を用い、1.1Rs から 30Rs (Rs は太陽半径) に至る領域において PDI 最大成長率の動径距離依存性を比較検討した。計算にはプラズマベータ、親波の規格化振幅、温度異方性の動径プロファイルを与え、断熱膨張シナリオおよび観測ベースの膨張シナリオの二種類を想定した。その結果、断熱膨張シナリオでは、等方モデルの最大成長率が太陽からの距離とともに増加するのに対し、異方モデルでは逆に減少傾向を示した。また、観測ベースの膨張条件下では、等方モデルに比べて異方モデルの方が垂直優位な温度異方性により最大成長率が大きい傾向を示した。また、 $R \approx 3Rs$ 付近で最大値を取り、その後は急激に減衰する特徴が異方モデルと等方モデルの両方で確認された。コロナでの親波の規格化振幅の二乗値が 0.01 の結果では異方モデルと等方モデルの最大成長率の差として約 0.05 ω_0 が 3Rs-8Rs で確認された。これらの結果は従来の等方的モデルに基づく予測とは異なり、温度異方性が PDI の有効性に強く影響することを示唆している。以上の結果は、PDI が密度擾乱生成や乱流加熱に果たす役割の理解を進める上で、温度異方性を考慮した理論モデルの必要性を示唆した。本研究は、近年の探査機観測データと組み合わせることで、太陽風形成過程の理解や PDI の観測的同定に新たな視座を与えるものと期待される。