

## 太陽風アルヴェン乱流とイオンビーム不安定性 Alfvenic turbulence and ion beam instabilities in the solar wind

成行泰裕<sup>1</sup>, 羽田亨<sup>2</sup>, 坪内健<sup>3</sup>  
Yasuhiro Nariyuki<sup>1</sup>, Tohru Hada<sup>2</sup>, Ken Tsubouchi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>富山大・人間発達, <sup>2</sup>九大・総理工, <sup>3</sup>東大・地惑  
<sup>1</sup>Univ. Toyama, <sup>2</sup>Kyushu Univ., <sup>3</sup>Univ. Tokyo

太陽からは秒速数百キロメートルの高速のプラズマ流(太陽風)が常時噴き出しており、この太陽風プラズマが届く範囲は太陽圏と呼ばれている。太陽圏の人工衛星による直接探査は半世紀近くの歴史があり、Helios衛星による0.3AU(AU:天文単位、1AUが太陽地球間距離)での観測が最も太陽に近く、遠方ではVoyager衛星による太陽圏から星間領域への脱出が本年末にも見込まれている。

太陽風がアルヴェン速度の10倍以上の高速まで加速される機構は100万度にも達する太陽の外層大気(コロナ)と密接に関わっていると考えられているが、これらは現在でも未解決の問題である。また、惑星間空間中の太陽風プラズマは太陽表面のごく近傍を除いてベータ値(プラズマ圧と磁気圧の比)は1前後の値であり、非断熱的な加熱過程が存在することも知られている。さらに、磁気擾乱の振幅は背景磁場強度と同程度であることが知られており、観測される乱流や不連続構造も多様性に富んでいる[1]。このような太陽風プラズマの非線形・非平衡な性質の包括的な説明は現時点では与えられていないが、その解明を目指す衛星「その場」観測計画が欧米を中心に進められている。

惑星間空間における太陽風プラズマ中の加熱過程や乱流の統計的性質の解明は、グローバルな太陽圏や宇宙線の輸送過程のモデリングを進める上でも不可欠な要素である。この解明へ向けた重要な課題として、太陽風プラズマ中で頻繁に観測される磁場とプラズマ速度の間の強い相関関係(アルヴェン性)を持つ磁気流体乱流(アルヴェン乱流)の散逸過程の解明が挙げられる。これまでの観測結果より、低周波のアルヴェン乱流は地球軌道より内側の内部太陽圏(特にコロナホール起源の太陽風中)においてはWKB的な空間発展をする一方で、散逸領域の波動は空間発展も乱流スペクトルのべきも低周波成分とは異なることが知られて

いる[2]。また、低周波成分のアルヴェン性は太陽風速度と良い相関があることが昔から知られているが、最近の研究からは散逸領域の乱流の場合は太陽風速度との相関は小さいことが示されている[3]。これらの太陽風乱流の性質は、乱流の散逸を担う波動成分のダイナミクスに大きく依存していると考えられており、現状は様々なシナリオが検討されている段階である。

近年では、3次元の乱流計算を念頭に置いた運動論モデル(Gyrokinetic model[4]など)や運動論的MHDモデル(Landau-fluid model[5])などが太陽風乱流の議論にも積極的に導入されており、アドホックな粘性項による散逸を用いない研究も進んでいる。一方で、散逸領域の波動の議論を難しくしている要因の一つに、太陽風プラズマ中には散逸領域の波動を励起する過程(種々の不安定性)の存在がある。実際、不安定性の閾値と高周波の波動成分の間には良い相関があることが知られている[6]。このような運動論的な不安定性起源の波動と乱流の散逸過程の関係はよく分かっていない。

本講演では、太陽風中で頻繁に観測されるプロトンビームによる不安定性と低周波アルヴェン波が共存する系を題材にして、太陽風プラズマ乱流素過程の一端を紹介する。本講演ではまず、プロトン(イオン)ビーム不安定性に関するパラメータ空間上の簡単な紹介を行うが、その中で過去15年程度の研究の進展を紹介する[7,8]。特に重要な進展は、太陽風プラズマのパラメータ範囲において、背景磁場に平行なビームによって励起される運動論アルヴェン波についての理論・シミュレーション研究が進んだことである(Fig.1)[8]。

これらの過去の進展を踏まえて、本講演では(1)ビーム不安定性そのものの性質が低周波アルヴェン乱流の存在によって変化すること[9]、(2)速度空間におけるビーム成分の散乱によって波動の分散関係が時間的に変化すること



[10]、(3)ビーム不安定性起源の波動がアルヴェン乱流と波数空間上における非局所的な相互作用が生じ得ること[11]、を紹介する。特に、(2)(3)は低周波アルヴェン乱流の減衰過程に直接影響を与える重要な過程である。また、これらの特徴は太陽風プラズマ中の素過程が必ずしも個々の過程（モデル）のパッチワークではないことを示している。

また、このような系の性質は、太陽風とは種々のパラメータが異なるものの、磁気圏前面、リコネクション領域、超新星残骸等の衝撃波起源のイオンビームが乱流と共存する領域の理解にも重要であると考えられる。本講演ではこれらの宇宙・天体プラズマにおける現象との関係性についても議論を行う。

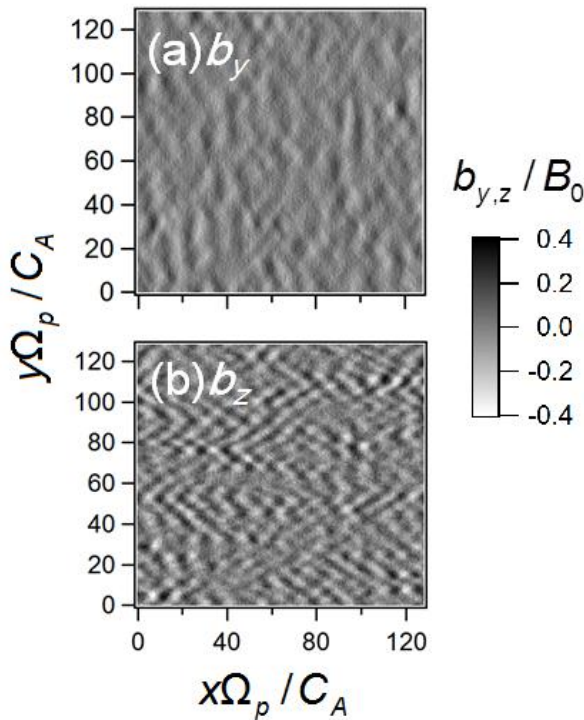


Figure 1 速度 $U=2.2C_A$  ( $C_A$ : アルヴェン速度)、背景電子に対する密度比0.15のプロトンビームにより励起された運動論アルヴェン波を表す。空間はプロトン慣性長で規格化しており、初期のベータ値はプロトン・電子共に0.5である。背景磁場 $B_0$ は $x$ 方向で、 $x$ - $y$ 平面で計算を行っている。(a)と(b)はそれぞれプロトンジャイロ角周波数で規格化した時間 $t=150$ の時の $b_y$ 、 $b_z$ であり、運動論アルヴェン波の励起によるシア成分( $b_z$ )の擾乱が現れているのが確認できる。 $b_y$ に見られる背景磁場に平行方向の構造は良く知られた共鳴型のイオンビーム不安定性[7]で励起された右偏波の磁気流体波である。

- [1] R. Bruno, and V. Carbone, Living Rev. Solar Phys., 2(4) (2005). [Online Article], <http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-4>
- [2] C. -Y. Tu, and E. Marsch, Space Sci. Rev., 73 (1995).
- [3] R. J. Leamon, et al, J. Geophys. Res., 103(A3), 4775 (1998); Hamilton, K. et al, J. Geophys. Res., 113 (2008).
- [4] G. G. Howes, Astrophys J., 651, 590 (2006); G. G. Howes et al, Phys. Rev. Lett., 107, 035004 (2011).
- [5] T. Passot, and P. L. Sulem, Phys. Plasmas, 11(11), 5173 (2004); P. Hunana et al, Astrophys. J., 743, 128 (2011); T. Passot et al, Phys. Plasmas 19, 082113 (2012).
- [6] S. D. Bale, et al, Phys. Rev. Lett., 103, 211101 (2009); B. A. Maruca et al, Pys. Rev. Lett., 107, 201101 (2011).
- [7] X. Y. Wang, and Y. Lin, Phys. Plasmas, 13, 052102 (2006).
- [8] W. Daughton, and S. P. Gary, J. Geophys. Res., 103, 20613 (1998); L. Yin et al, Phys. Plasmas, 14, 062104 (2007).
- [9] J. A. Araneda, and L. Gomberoff, J. Geophys. Res., 109, A01106 (2004); Y. Nariyuki, J. Plasma Fusion Res. SERIES, 8, 217 (2009).
- [10] Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi, J. Geophys. Res., 114, A07102 (2009).
- [11] Y. Nariyuki et al, Physics of Plasmas, 19, 082317 (2012).