

惑星間空間から星間媒質へ広がる宇宙空間プラズマ観測の最前線 Frontier of space plasma observations expanding from interplanetary space to interstellar medium

徳丸 宗利^{1*}
TOKUMARU, Munetoshi^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

太陽は超音速のプラズマ流、太陽風を吹き出すことで星間媒質の中に太陽圏 (heliosphere) と呼ばれる領域を形成している。その広がりには約 100AU にも達する。太陽圏の内部ではプラズマと電磁場の相互作用を通じて太陽風の生成、衝撃波の励起・伝搬、高エネルギー粒子の加速などの興味深い物理現象が発生することから、そこは宇宙空間プラズマの実験場として様々な観測研究が展開されてきた。その一つが、惑星間空間シンチレーション (interplanetary scintillation, IPS) を使った太陽風の遠隔測定に基づいた研究である。これまでの IPS 観測からは、太陽風のグローバルな分布が太陽活動に密接に関係しながら短期・長期の時間スケールで大きく変動することが明らかになっている (Tokumaru et al., 2013)。

現在、太陽圏の観測研究には大きな展開が起こっている。その新展開の一つは、Voyager 1,2 (V1,V2) や IBEX 探査機による太陽圏境界域の探査によってもたらされた (Gurnett et al., 2013, McComas et al., 2009)。V1 は 2004 年に終端衝撃波を 94AU で通過していたが、2012 年 8 月に 121AU で太陽圏境界面 (heliopause) に達し、星間空間へ突入した。V2 は 2007 年に 83AU で終端衝撃波を通過、目下、heliopause を目指して航行中である。一方、IBEX 衛星は高エネルギー中性原子 (ENA) の撮像観測により太陽圏をとりまく大規模なリボン構造の存在が明らかになっている。これらの観測データを解釈しようとするとき不可欠となるのが、太陽圏境界域の 3 次元構造に関する情報である。先述した IPS 観測からは内部太陽圏における太陽風のグローバルな分布が得られることから、そのデータに基づいた MHD シミュレーションにより太陽圏境界域の構造を精度よく決定することができる。この IPS 観測による太陽圏シミュレーションデータを Voyager や IBEX の研究チームに提供することで、太陽圏境界域の共同研究が進められている。

もう一つの新展開は特異な太陽活動の到来によってもたらされた。今サイクルは太陽活動が過去 100 年来の低調さであり、これに伴って太陽風密度の顕著な低下や高速風・低速風の分布が従来と異なるなどの変化が起きていることが IPS 観測から判明している (Tokumaru et al., 2009, 2010, 2012)。この事実は太陽圏境界域や惑星磁気圏への影響 (宇宙天気) に関する研究において重要である他、太陽風加速機構の謎を解く手がかりを与える。また、今回の特異な太陽活動における観測結果は、17 世紀のマウンダー極小期における地球寒冷化の謎を解明する手がかりともなる。

数年後に予想される V2 の星間媒質への到達により、太陽圏を取りまく星間プラズマ雲 (Local Interstellar Cloud) について詳細な議論が可能になるだろう。太陽圏は Local Bubble と呼ばれる低密度 (但し高 β) な領域内にあり、そのプラズマ特性についてパルサー電波観測などから議論されている (Spiegel, 2009)。今後は Local Bubble と太陽圏を一体とした領域で、探査機の直接測定と地上からの電波観測を組み合わせた宇宙空間プラズマの研究が発展しゆくであろう。

キーワード: 太陽風プラズマ, 惑星間空間シンチレーション, 太陽圏, 恒星間媒質, 太陽活動周期
Keywords: solar wind plasma, interplanetary scintillation, heliosphere, interstellar medium, solar cycle

磁気圏におけるプラズマの階層構造と自己組織化 Scale hierarchy and self-organization in magnetospheric plasma

吉田 善章^{1*}
YOSHIDA, Zensho^{1*}

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科
¹ Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo

Inhomogeneous magnetic field gives rise to interesting properties of plasmas which are degenerate in homogeneous (or zero) magnetic fields. Magnetospheric plasmas, as observed commonly in the Universe, are the most simple, natural realization of strongly inhomogeneous structures created spontaneously in the vicinity of magnetic dipoles. In this talk, we describe the experimental results from a "laboratory magnetosphere" RT-1, and theoretical modeling of its spontaneous confinement.

The RT-1 device produces a magnetospheric plasma by a levitated superconducting magnet. Stable confinement (particle and energy confinement time = 0.5 s) of high-beta (local electron beta >0.7); electron temperature >10 keV plasma has been demonstrated (which are promising characteristics for an innovative concept of advanced fusion; it is also applicable as a particle trap for experimental particle physics or atomic physics). The radial profile of the electron density $n(r)$ is highly peaked. Fitting the data by a function $n(r) = n_0 r^{-p}$, we estimate $p=2.8\pm 0.4$ for a wide range of operating parameters. Multiplying $n(r)$ by the magnetic flux tube volume, we can estimate the particle number $N(r)$ in a unit magnetic-flux tube. While $n(r)$ is a steep increasing function towards the center of the dipole magnetic field, $N(r)$ is a decreasing function, hence interchange modes are stable. Whereas the simple kinetic model predicts a flat distribution of $N(r)$ [1], the model of grand-canonical equilibrium explains the observed equilibrium state [2].

Theoretically, we can describe the self-organized confinement of the magnetospheric plasma as a grand-canonical equilibrium in a "foliated phase space" of magnetized particles [3]. What makes the distribution function fundamentally different from the conventional Boltzmann distribution is the topological constraints on the phase space which limits the actual domain where the particles can occupy; the adiabatic invariants pose such constraints. Taking into account the constancy of the magnetic moment and the parallel action, we obtain a foliated phase space of coarse-grained variables, on which the invariant measure is distorted by the inhomogeneous magnetic field. The grand-canonical equilibrium has an inhomogeneous density when it is immersed in the laboratory flat space. Hence, the creation of a steep-density clump is a natural consequence of equipartition in the magnetic-coordinate phase space.

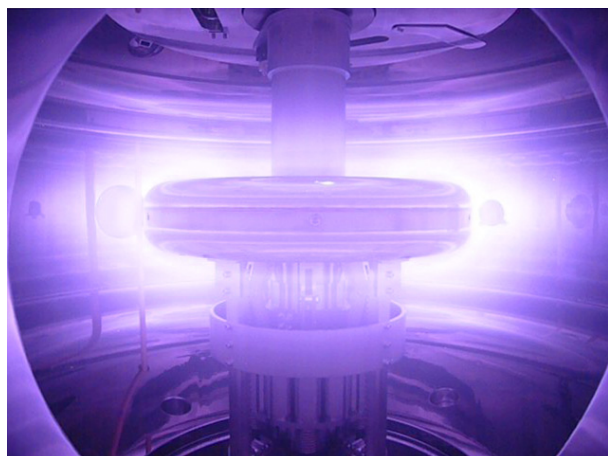
[1] A. Hasegawa, Phys. Scr. T116 (2005) 72.

[2] Z. Yoshida et al., Plasma Phys. Control. Fusion 55 (2013), 014018.

[3] Z. Yoshida and P.J. Morrison, in "Nonlinear physical systems: spectral analysis, stability and bifurcation", (ISTE and John Wiley and Sons, 2014) Chap. 18; <http://arxiv.org/abs/1303.0887>

キーワード: 内向き拡散, 断熱不変量, 葉層構造, 高ベータプラズマ, ダイポール磁場, 非中性プラズマ

Keywords: inward diffusion, adiabatic invariant, foliation, high-beta plasma, dipole magnetic field, non-neutral plasma



磁場を持たない障害物下流のウェイクへの太陽風プラズマの侵入 Solar wind plasma entry into the wake behind an unmagnetized obstacle

中川 朋子^{1*}
NAKAGAWA, Tomoko^{1*}

¹ 東北工業大学工学部情報通信工学科

¹Information and Communication Engineering, Tohoku Institute of Technology

月のように大規模な磁場構造を持たず、主として不導体で構成される障害物に太陽風が吹きつけた場合、プラズマのほとんどがその表面で吸着され、下流にはウェイクと呼ばれるプラズマ密度の薄い領域ができる。ウェイクへのイオンの侵入を考える際には、真空中へのプラズマの流入の理論が良く使われてきたが、地球軌道付近の太陽風には、バルク速度がイオンの熱速度より速く、電子の熱速度より遅いという特徴があるため、電子だけが太陽風のバルク速度に逆らって障害物の下流側に吸着することができ、下流側表面を負に帯電させる。この帯電による電場が、電子の流入を阻害しイオンを加速するため、太陽風中にできるウェイクの境界におけるプラズマの進入は、単に真空中へのプラズマ流入とは異なる様相を示すと考えられる。

帯電による電場はデバイ長の範囲内に限定されるため、デバイ長に対して大きな天体の場合は帯電を無視できると考えられがちであるが、ウェイク中は電子の密度が非常に下がっていてデバイ長自体が長いことに加え、天体の裏面までの長い距離にわたって電場による加速を受け続けるため、小さな天体よりも大きな天体のほうがむしろ、真裏にイオンが入りやすい。

本講演では、太陽風中のデバイ長に対し障害物の大きさを8倍、16倍、32倍と変えて行った帯電を入れた2次元粒子コードによるシミュレーション結果を報告する。

キーワード: ウェイク, 太陽風, 月, 帯電, デバイ長, 粒子シミュレーション

Keywords: wake, solar wind, surface charging, electron thermal speed, Debye length, particle-in-cell simulation

京コンピュータを用いた弱磁化小天体のグローバルブラソフシミュレーション Global Vlasov simulation of a small body with a magnetic anomaly with the K-computer

梅田 隆行^{1*}
UMEDA, Takayuki^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

The interaction between a plasma flow and a small dielectric body with a weak intrinsic global magnetic field is studied by means of a five-dimensional (5D) full electromagnetic Vlasov simulation with two configuration spaces and three velocity spaces. In the present study, entry processes of ions into the nightside wake tail are examined. The simulation result shows that the bow shock and the magnetopause are formed on the dayside. However, most of solar-wind ions are reflected at the dayside magnetopause and are picked up by the interplanetary magnetic field. Then, a small part of the reflected ions are taken into the deep wake tail near the body by the E cross B cycloid motion. The present result, in which the spatial resolution is low and the Debye-scale charge separation on the dayside surface is not solved, is obtained by using a recent cluster computer system. Currently we are performing a 5D high-resolution global Vlasov simulation by using the K-computer. The direct comparison between the low- and high-resolution runs would show importance of fully kinetic global simulations.

キーワード: シミュレーション, プラズマ, 小天体, 磁気圏, ブラソフコード, 京コンピュータ
Keywords: simulation, plasma, small geophysical body, magnetosphere, Vlasov code, K computer

木星磁気圏界面位置の太陽風動圧依存性 Dependence of Jovian Magnetopause Location on Solar Wind Dynamic Pressure

北川 普崇^{1*}; 笠原 慧²; 埜 千尋³; 木村 智樹²; 藤本 正樹²
KITAGAWA, Hiroataka^{1*}; KASAHARA, Satoshi²; TAO, Chihiro³; KIMURA, Tomoki²; FUJIMOTO, Masaki²

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ³ Institut de Recherche en Astrophysique et Planetologie

¹ Earth and Planetary Science, School of Science, University of Tokyo, ² Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³ Research Institute in Astrophysics and Planetology

木星磁気圏は太陽風動圧の変動により大きくその大きさを変化させると考えられている。これは磁気圏界面の前面の中心からの距離の頻度分布は2こぶであると観測されていることによる。頻度分布の2こぶの間の確率は非常に小さく、木星磁気圏の大きさは太陽風動圧の大きさでどちらかの状態に分かれると考えられている。しかしその一方で木星磁気圏界面位置の太陽風動圧依存性は位置を分けるような様相を示していない。ただしその解析では磁気圏内の磁気圧で考察されており、太陽風動圧そのものではない。その解析で磁気圧を用いていたのは木星軌道において太陽風観測点が存在しない為である。そこで我々は、MHDシミュレーションを用いて地球近傍の太陽風パラメータを木星軌道まで伝播させる事により、木星磁気圏界面位置の太陽風動圧依存性を解析し、2こぶ分布の説明を目指した。本研究では、Galileo衛星のデータを太陽風動圧とともに解析した。その結果2こぶのピークは太陽風動圧の頻度分布を反映したものである可能性が高いと分かった。2状態に分かれるような分布の形状はGalileo衛星の磁気圏界面を通過する時期の太陽風動圧の頻度分布がゆがんでいることに起因している可能性が考えられると分かった。

キーワード: 木星磁気圏界面, 太陽風動圧

Keywords: Jovian Magnetopause, Solar Wind Dynamic Pressure

Pickup ion acceleration via multiple reflection between two successive CIRs Pickup ion acceleration via multiple reflection between two successive CIRs

坪内 健^{1*}
TSUBOUCHI, Ken^{1*}

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科
¹Tokyo Institute of Technology

Interstellar neutral particles, during their propagation inside the heliosphere, become ionized by the charge exchange with the solar wind (SW) plasma. The interplanetary magnetic field picks up these newborn ions, called "pickup ions" (PUIs), and carries them away into the outer heliosphere with SW. The gyrating velocity of PUIs around the magnetic field is equivalent to the SW flow speed, hundreds of km/s, which is much faster than the SW thermal velocity. This property enables PUIs to be accelerated more efficiently at the shock than the thermal SW particles. Thus PUIs are considered to be the dominant source of anomalous cosmic rays (ACRs) generated at the heliospheric termination shock.

However, the well-known diffusive shock acceleration (DSA) process alone is insufficient to raise the PUI energy up to the ACR range, typically in the order of MeV. This is because the primary PUI energy (10 keV at most) is still too low to be injected into DSA, where at least hundreds of keV is necessary. Therefore, some preacceleration should take place inside the heliosphere before SW and PUI reach the termination shock. Interplanetary shocks are the most possible source for it. In the present study, we focus on the shocks driven by the interaction of the fast SW with the ahead-flowing slow SW. The regions bounded by these shocks are called corotating interaction regions (CIRs); forward shock in the slow SW side and reverse shock in the fast SW side.

We demonstrate how particles are accelerated at this CIR system by performing hybrid simulations. The simulation results show that more efficient acceleration is identified in the PUI reflected at the shock than in those transmitted through the shock. The acceleration takes place while the PUI stays close to the shock surface. This situation is similar to the shock-drift or surfing acceleration mechanism. However, our results indicate that the acceleration is not dominant in the component transverse to the magnetic field, i.e., the direction of motional electric field. Rather, the net acceleration is confirmed in the field-aligned component. The mechanism will be discussed in terms of the characteristic of the Lorentz force balance acting on PUIs.

The periodic boundary condition applied in the present simulation virtually allows the successive appearance of two CIRs. After the reflected PUI travels the "inter-CIR" space, it encounters the shock of another CIR, where the reflection again takes place. While one reflection increases the PUI energy only a few times, this multiple reflection process yields the most energetic PUI with its maximum energy up to 100 keV, probably enough for the injection into DSA. Recent CIR observations have confirmed the presence of the energetic PUI in the solar wind between two CIRs, which may prove the present results.

超新星残骸での H α 輝線放射と非熱的 X 線放射で測定した膨張速度の差異の理論的研究 Study on The Difference Between Proper-Motion of Balmer hydrogen line emission and Non-Thermal X-Ray emission in SNRs

霜田 治朗^{1*}; 井上 剛志²; 大平 豊¹; 山崎 了¹; 添田 正信¹
SHIMODA, Jiro^{1*}; INOUE, Tsuyoshi²; OHIRA, Yutaka¹; YAMAZAKI, Ryo¹; SOEDA, Masanobu¹

¹ 青山学院大学, ² 国立天文台

¹Aoyama Gakuin University, ²National Astronomical Observatory of Japan

粒子加速の現場であると考えられている超新星残骸では、加速電子によるシンクロトロン放射や、水素原子からの H α 輝線等が観測されている。これら二つの放射の観測から、衝撃波上流の運動エネルギーをどれだけ加速粒子の生成に使ったのかが見積もられている (Helder et al. 2009)。標準的な粒子加速理論 (D.S.A.) によると加速粒子は衝撃波近傍で加速すると考えられているので、X 線シンクロトロン放射領域の移動速度を観測することで衝撃波の速度、すなわち運動エネルギーが分かる。また H α 輝線の線幅から衝撃波下流の温度が分かる。水素原子の電荷交換反応によって下流の陽子が水素原子から電子をもらい H α 輝線を放射するので、下流の陽子温度に対応した線幅をもつと考えられるためである。

しかし、これら二つの放射は同じ領域で光っているように見えるが、その移動速度は X 線シンクロトロン放射が約 6000km/s (Helder et al. 2009)、H α 輝線が約 1200km/s (Helder et al. 2013) と大きな差があるため、X 線シンクロトロン放射と H α 輝線の放射領域は実は異なる可能性がある。

本研究では衝撃波が伝搬する星間媒質の現実的非一様性によって衝撃波の伝搬速度に局所的な差が生まれ、衝撃波面の形状が波打つ効果を考える。この効果を考慮した 3 次元の MHD シミュレーション (Inoue et al. 2013) の結果を擬似的に観測することで上述の Helder et al. の結果が整合的に理解できることを示す。

キーワード: 超新星残骸, 衝撃波, 宇宙線

Keywords: supernova remnants, shock wave, cosmic ray

ジェットと星間中性水素クランプ相互作用の磁気流体シミュレーション Magnetohydrodynamic Simulations of the Interaction of a Jet with Interstellar Neutral Hydrogen Clumps

朝比奈 雄太^{1*}; 小川 崇之¹; 松元 亮治¹
ASAHINA, Yuta^{1*}; OGAWA, Takayuki¹; MATSUMOTO, Ryoji¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科

¹Graduate School of Science, Chiba University

An astrophysical jet transfers the energy released near the gravitating object and interact with the interstellar medium. When the jet propagates in the interstellar medium interacting with its environment. We carried out magnetohydrodynamic simulations of the jet propagation in neutral hydrogen (HI) clumps taking into account the interstellar cooling. At the initial state, HI clumps are assumed to be in thermal equilibrium. As the clumps are compressed by the bow shock ahead of the jet, the shocked cloud is heated up but since the density enhancement increases cooling rate, the cloud is subsequently cooled down. As a result, cold, dense sheath is formed around the jet. The enhanced density triggers the cooling instability and prompts the formation of the cold, dense gas.

We studied the dependence of numerical results on the volume filling factor of the HI clumps. We found that when the volume filling factor is large, the propagation speed of the jet is slow and arc-shaped cold dense region is formed. When the volume filling factor is small, propagation speed does not decrease so much and dense cloud distribution is more elongated. The distribution of the cold, dense gas and the length of the jet propagation speed depend on the filling factor.

We report the application of this model to molecular clouds toward the stellar cluster Westlund 2 and TeV γ -ray source HESS J1023-575 observed by NANTEN2 and Mopra telescope. HESS J1023-575 is located between these molecular clouds. The shape of molecular cloud on the right of HESS J1023-575 is like an arc and molecular clouds on the other hand distribute linearly. The difference of the filling factor can explain the difference of the shape of these molecular clouds.

キーワード: ジェット, 星間ガス, 磁気流体

Keywords: jet, interstellar medium, magnetohydrodynamics

磁気圏型 RT-1 装置における高ベータプラズマ生成と計測器開発 High beta plasma production and their diagnostics in magnetosphere RT-1 device

西浦 正樹^{1*}; 吉田 善章¹; 齋藤 晴彦¹; 矢野 善久¹; 川面 洋平¹; 野上 智晃¹; 山崎 美由梨¹
NISHIURA, Masaki^{1*}; YOSHIDA, Zensho¹; SAITOH, Haruhiko¹; YANO, Yoshihisa¹; KAWAZURA, Yohei¹; NOGAMI, Tomoaki¹; YAMASAKI, Miyuri¹

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Graduate school of frontier sciences, The University of Tokyo

磁気圏型プラズマ装置 (ring trap 1: RT-1) は新しい概念の核融合実験装置である。実験室において真空容器内に磁気浮上させた超電導コイルによりダイポール磁場を発生させ、その磁場中に閉じ込められたプラズマの特性を理解するための研究を進めている。ここ数年、電子サイクロトロン加熱 (electron cyclotron heating: ECH) により、数 10keV の高エネルギー電子の生成やその電子が引き起こす不安定性の励起、密度分布のピーキングなど多様な現象が観測されている [1, 2]。ECH 入射パワーの増強を行い、従来の運転密度領域である 10^{17}m^{-3} を更に拡大させるための最適化実験 (ビーム偏波制御, 収束性の向上) を進めている。生成したプラズマはミリ波干渉計を用いた線平均密度計測により密度評価を行っている。その結果入射ビームの最適化により線平均密度で $6.2 \times 10^{17}\text{m}^{-3}$ かつ電子反磁性は 5.6 mWb にまで到達した。この値は磁気圧力に対するプラズマ圧力の比であるベータ値がおおよそ 100% 近くに達していると予想される。このようなプラズマに対し、密度上昇に伴う空間構造の変化や密度ピーキングを調べるためにマイクロ波反射計の整備を行い、初期結果を得ており、解析を進めている。

ECH を用いた場合、電子加熱は十分行えるがイオン温度は低い状態にある。そこで 3 ターンループアンテナを用いた遅波によるイオンサイクロトロン加熱 (ion cyclotron heating: ICH) を行っている。ECH 単独で電子密度を 10^{18}m^{-3} オーダーに上昇させた場合、加熱効率が向上し、イオン加熱によるイオン温度が向上することが期待できる。ICH によるイオン温度上昇をエネルギーアナライザーにより観測している。

ICH によるイオン加熱時により詳細なイオンの加熱情報を測定するために、イオンのエネルギーとピッチ角情報を得ることができるイオンプローブによる測定の前準備を進めている。元々は核融合装置内で発生した高エネルギーイオンの損失過程を計測するために使われていたが、その手法を RT-1 プラズマのイオンのエネルギー分布測定に適用することを念頭に開発を進めている。このイオンプローブは先端に設けたピンホール、その内部に埋め込まれたシンチレータから構成されている。ピンホールからプローブヘッド内に侵入したイオンはプローブヘッド内のシンチレータ上に発光分布を作る。その発光分布を高感度な EMCCD カメラにより観測することでイオンのエネルギーとピッチ角を同時に得ることが可能になる。

発表では先に述べた RT-1 における ECH の最適化によるパラメータ領域の拡大、イオンプローブ設置に向けた進捗状況、及び今後の予定について報告する。

参考文献

[1] Z. Yoshida et al., Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 235004.

[2] H. Saitoh et al., Nucl. Fusion 51 (2011) 063034.

キーワード: プラズマ, 磁気圏, プラズマ計測, プラズマ加熱
Keywords: plasma, magnetosphere, plasma diagnostics, plasma heating

太陽風－イオンスケール磁気圏相互作用のハイブリッドシミュレーション Hybrid simulations of the interaction between the solar wind and the ion scale magnetosphere

中村 雅夫^{1*}
NAKAMURA, Masao^{1*}

¹ 大阪府立大学
¹Osaka Prefecture University

The interaction between the solar wind and the ion scale magnetosphere with a dipole magnetic field is investigated by a three-dimensional hybrid simulation. In the present study, the ion scale magnetosphere has a dayside stand-off distance which is several to a hundred times larger than the ion Larmor radius of the solar wind proton in the magnetic field strength at the dayside magnetopause boundary. The hybrid simulation treats the ions as kinetic super particles via particle-in-cell method and the electrons as a massless fluid. In the interaction between the solar wind and the magnetosphere, the interplanetary magnetic field (IMF) condition controls not only the reconnection regions but also the subsolar sheath flow due to the ion kinetic effects. Those influence the structures of the bow shock and the magnetopause boundary layer. We will also discuss the momentum transfer process from the solar wind into the magnetosphere and to the magnetized object.

キーワード: イオンスケール磁気圏, 太陽風ミニ磁気圏相互作用, 3次元ハイブリッドシミュレーション
Keywords: Ion scale magnetosphere, Interaction between solar wind and mini-magnetosphere, 3D hybrid simulation