

Electron dynamics surrounding the X-line in magnetopause-type asymmetric reconnection

*銭谷 誠司¹、長谷川 洋²、長井 嗣信³

*Seiji Zenitani¹, Hiroshi Hasegawa², Tsugunobu Nagai³

1. 自然科学研究機構国立天文台、2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、3. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

1. NAOJ National Astronomical Observatory of Japan, 2. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

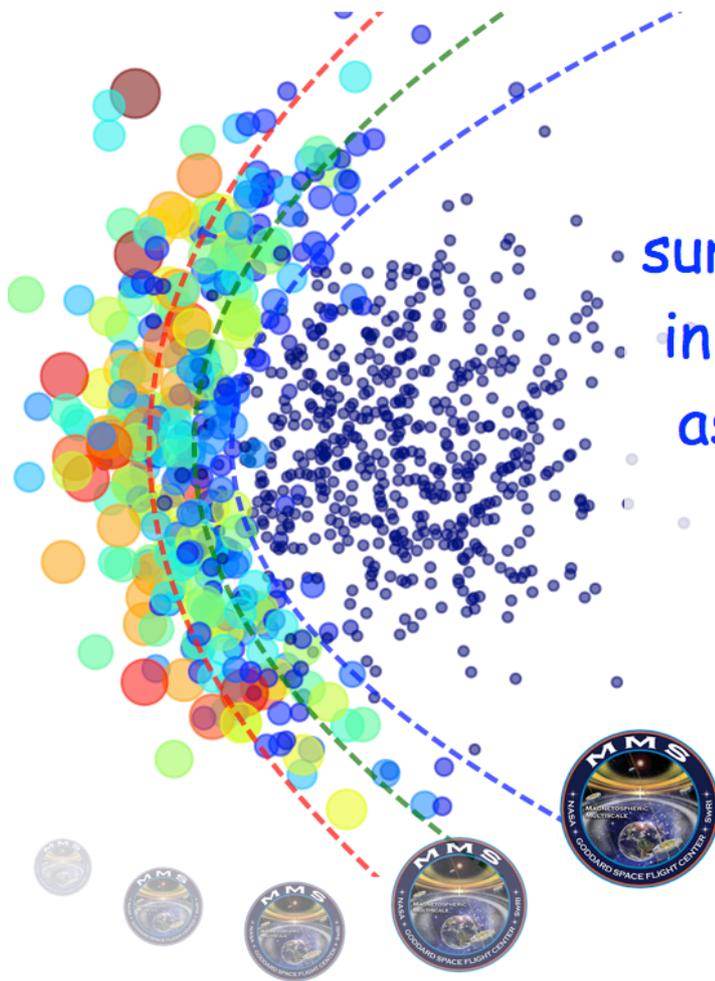
Electron dynamics surrounding the X-line in magnetopause-type asymmetric reconnection is investigated using a two-dimensional particle-in-cell (PIC) simulation. We study electron properties of three characteristic regions in the vicinity of the X-line. The fluid properties, velocity distribution functions (VDFs), and orbits are studied and cross-compared. In the low-beta side of the X-line, the normal electric field enhances the electron meandering motion from the high-beta side. The motion leads to a crescent-shaped component in the electron VDF, in agreement with recent studies. In the high-beta side of the X-line, the magnetic field line is highly stretched in the third dimension. As a result, its curvature radius is comparable with a typical electron Larmor radius. The electron motion becomes chaotic, and therefore the electron idealness is no longer expected to hold. Around the middle of the outflow regions, the electron nonidealness is coincident with the region of the nonadiabatic motion.

Reference:

- Zenitani, S., H. Hasegawa, and T. Nagai, submitted to *J. Geophys. Res.* (MMS special issue)

キーワード：磁気リコネクション、マグネトポーズ、粒子ダイナミクス

Keywords: magnetic reconnection, magnetopause, particle dynamics



Electron dynamics
surrounding the X-line
in magnetopause-type
asymmetric magnetic
reconnection

Seiji ZENITANI

with H. Hasegawa, T. Nagai

Triggering fast tearing: from MHD to kinetic effects

*Marco C M Velli¹, Fulvia Pucci², Anna Tenerani¹

1. University of California Los Angeles, 2. NIFS-Princeton

One of the main questions about magnetic reconnection concerns how this mechanism may account for fast magnetic energy conversion to kinetic and thermal energies, resulting in explosive events in astrophysical and laboratory plasmas. Over the past decade progress has been made on the initiation of fast reconnection via the plasmoid instability and what has been called "ideal" tearing, which sets in once current sheets thin to a critical aspect ratio: as shown by Pucci and Velli (2014) once the thickness reaches a scaling $a/L \sim S^{-1/3}$, the time scale for the instability to develop becomes of the order of the Alfvén time and independent of the Lundquist number. However, given the large values of the Lundquist number in natural plasmas, this transition might occur for thicknesses of the inner, singular layer, approaching the ion inertial length. When this occurs, Hall currents produce a three-dimensional quadrupole structure of magnetic field, and the dispersive waves introduced by the Hall effect accelerate the instability. Here we present a linear study showing how an "ideal tearing mode" is achieved when Hall effects are taken into account, including scaling laws for sheet aspect ratios and growth rates. We show that for an appropriate scaling of the aspect ratio in the parameter space $(S, d_i/L)$, the instability develops on ideal timescales and the associated growth rate does not depend on the parameters, suggesting a revision of the phase diagrams describing different regimes for magnetic reconnection in space and laboratory plasmas.

Keywords: Plasma, Magnetic Reconnection, Heliosphere

Macroscopic quasilinear kinetic model for electrons and protons instabilities in homogeneous and in inhomogeneous solar wind plasmas

*Muhammad Sarfraz¹, Peter H. Yoon^{2,3}

1. Department of Physics, GC University Lahore, Katchery Road, Lahore 54000, Pakistan, 2. University of Maryland, College Park, Maryland 20742, USA, 3. School of Space Research, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi 446-701, Korea

Solar wind species like electrons, protons and alpha particles are detected to possess temperature anisotropies with respect to ambient magnetic field. Microinstabilities driven by these anisotropies are responsible for an upper check of higher values of temperatures at different radial distances of solar wind. For a homogeneous and non-collisional medium, we employed a macroscopic quasilinear kinetic model to display asymptotic variations and saturations of temperature anisotropies and wave energy densities for electromagnetic electron cyclotron (EMEC) and electron firehose (EFH) instabilities. A bi-Maxwellian form of particles distribution adopted all the time except that temperatures may vary in time t . We showed that, in $(\beta_{\parallel}, T_{\perp}/T_{\parallel})$ phase space, the saturations stages of anisotropies associated with core and halo electrons lined up on their marginal stability curves for EMEC instability. For case of EFH instability, the electrons and protons dynamics saturated at firehose and proton cyclotron marginal stability curves, respectively. Next, we interpreted the outstanding issue that most of observed proton data resides in nearly isotropic state in phase space. Here, in quasilinear frame-work of inhomogeneous solar wind system, we formulated a set of self-consistent quasilinear equations to show a dynamical variations of temperatures with spatial distributions. On choice of different initial parameters, we showed that, interplay of electron and proton instabilities provided an counter-balancing force to slow down the protons away from marginal stability states. Our present approach may eventually be incorporated in global-kinetic models of the solar wind electrons and ions.

Keywords: solar wind, instabilities

経路積分を使った相対論的拡散の計算

Proper time Path Integral for Relativistic Diffusion

*中村 匡¹

*Tadas Nakamura¹

1. 福井県立大学

1. Fukui Prefectural University

時間に関して一回微分の拡散方程式の解は、速度が無限大の成分をもっていることが知られている。たとえば、一番単純なガウス型の解になるような方程式の場合、 $t=0$ での初期条件が δ 関数でも、 $t>0$ では無限遠でゼロにならない成分がでてくる。非相対論の計算では、多くの場合これは無視できるくらい小さい値なので無視してよいが、相対論では因果律をやぶることになるので問題になってくる。例えば、このタイプの拡散方程式の解には、物理的にはありえない増大するモードがあらわれることが報告されている。

速度無限大の成分が必要なのは、マルコフ的酔歩問題では N ステップの移動距離が一ステップの距離の \sqrt{N} のオーダーでしか増えないのが理由である。この状況で有限時間で有限の移動距離を確保するためには、一ステップで無限大移動しなければならないことになる。したがって、マルコフ的（時間に対して一回微分）な方程式では因果律をやぶることは不可避である。

この問題を克服するため、Israel & Stewart (1970) は時間に関して二階微分の項を含む理論を提唱した。この路線はその後因果的熱力学 (Causal Thermodynamics) と呼ばれ、21世紀に入ってからも多くの論文が書かれている。しかしながら、因果的熱力学での2次以上の時間微分の項は物理的な散逸過程の考察から得られたものではなく、無限大の速度をおさえるために技術的に導入されたものであるため、得られた解が物理過程を正しく記述している保証はない。たとえば、Israel & Stewart の理論から熱伝導方程式を導出すると、いわゆる電信型の方程式になり、伝搬速度が大きくなると波動方程式に漸近して速度の上限を保証するが、波動方程式が散逸をあらわしているとは言えない。

この困難をの解決するため、本研究では固有時を使って粒子の拡散を計算する。たとえば、時空間 (x,t) の二次元平面内を固有時 τ に沿って拡散する粒子の分布 $f(x,t;\tau)$ を考えよう。この二次元時空間内での拡散は、 t 方向には前進しかしないので、普通の拡散方程式の形にはかけない。そこで、経路積分の表現を利用し、一ステップごとに energy-shell の条件を δ 関数の形ではさむことによって時間発展を追った。量子力学の経路積分では、 δ 関数による制限がゴースト粒子を生むなど難しい問題があるが、拡散方程式の場合は簡単な表現にまとめられることがわかった。

キーワード：相対論的拡散、経路積分、固有時

Keywords: Relativistic Diffusion, Path Integral, Proper time

Cyclic self-reformation of perpendicular shocks in two-dimensional particle-in-cell simulation

*梅田 隆行¹、大長 勇輝¹

*Takayuki Umeda¹, Yuki Daicho¹

1. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

1. Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

The cyclic self-reformation of perpendicular collisionless shocks was first identified in one-dimensional (1D) kinetic particle-in-cell simulations. In early studies, the reformation was defined as the cyclic accumulation and release of ions. The release ions toward upstream (ion reflection) takes place periodically at the ion gyro period of the downstream, which forms the shock foot region. Later, the cyclic self-reformation of perpendicular shocks was also identified in two-dimensional (2D) full particle-in-cell simulations with a simulation domain shorter than the ion inertial length in the shock tangential direction. However, some of recent 2D full particle-in-cell simulations with a large simulation domain argued against the evidence of the cyclic self-reformation of perpendicular shocks due to rippled structures at the shock front. In the previous studies, the cyclic self-reformation was identified from the cyclic oscillation of the magnetic field at overshoot, since the magnetic field and the ion density are well correlated in 1D simulations and 2D simulations with a small simulation domain. In the present study, we analyze ion particle data obtained from large-scale 2D full particle-in-cell simulations with different ion-to-electron mass ratio, and discuss the effect of the mass ratio to the evidence of the cyclic self-reformation of perpendicular shocks.

キーワード：無衝突衝撃波、粒子シミュレーション

Keywords: collisionless shock wave, particle-in-cell simulation

宇宙線の異常輸送拡散モデル

Anomalous convection diffusion model of cosmic rays

*羽田 亨¹

*Tohru Hada¹

1. 九州大学大学院総合理工学研究院流体環境理工学部門

1. Earth System Science and Technology, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

乱流場中の宇宙線（高エネルギー荷電粒子）輸送は、天体物理学や数理科学の観点から重要な問題である。特に、乱流が大振幅の磁気流体乱流の場合、非ガウスの統計性質を持った輸送があらわれる。このような異常輸送を表現する自然な数理モデルとして、時間微分または空間微分項にフラクショナル（分数）微分を含んだ輸送拡散方程式を考えることができる。講演ではまず、フラクショナル微分および積分について簡単に紹介し、その数値評価の方法を説明する。次に、重要な応用として、フラクショナル衝撃波拡散方程式の数値解を求め、準拡散および超拡散を行う粒子によるテスト粒子計算の結果と比較議論する。本モデルが適用可能な他の高エネルギー天体現象についても言及する。

キーワード：宇宙線、拡散

Keywords: cosmic rays, diffusion

球領域内部での流れを伴うMHD緩和 MHD relaxation with flow inside a sphere

*山本 晃平¹、陰山 聡¹

*Kohei Yamamoto¹, Akira Kageyama¹

1. 神戸大学

1. Kobe University

完全導体の球状容器内部に閉じ込められたMHD (Magnetohydrodynamics, 磁気流体力学) 流体の緩和現象は古くから研究されてきた。磁気ヘリシティ保存という拘束条件の下で磁気エネルギーが最小となるというWoltjer-Taylor理論によれば、緩和状態は(電流と磁場が平行な)スフェロマクと呼ばれるforce-free状態である。スフェロマクが安定な磁場配位であることは実験で確認されているだけでなく、その安定性を利用した様々なプラズマ実験(例えばリコネクション実験)も行われている。しかし、Woltjer-Taylor理論では最終状態での流れのエネルギーが無視できることが仮定されている。我々はこの仮定が成り立たない場合を探求するため、流れがあるMHD緩和状態がどのようなものかを球を計算領域としたMHDシミュレーションで調べた。基本方程式は圧縮性のMHD方程式である。原点を含む全球でのMHD方程式の時間発展を、最近開発したYin-Yang-Zhong格子 [Hayashi & Kageyama, JCP, 2016] を使った数値的に追跡した。古典的なMHD緩和のシミュレーションと本シミュレーションの最も大きな違いは、本研究では(原点も含めた)全球ジオメトリでのMHD方程式を高解像度で(すなわち低粘性率で)計算できるという点である。一般的なスフェロマク解は、半径方向の固有関数(球ベッセル関数)の固有値 n と緯度経度方向の固有関数(球面調和関数)の固有値 (l, m) で特徴付けられる。本研究では、高次モード $l, m > 1$ に弱い摂動を加えたものを初期条件としてその時間発展を追跡した。なお、初期の圧力、密度は一様、速度場はゼロとした。不安定性のため、高次モードのスフェロマク磁場は計算直後に崩れ始め、流れが生じる。流体の粘性が十分低いため、この流れは長時間(散逸時間)維持される。この(準)定常状態における流れの運動エネルギー E_k は、磁気エネルギー E_M と比較してそれほど大きくない [$E_k/E_M = O(10^{-3})$] もの、緩和状態における流れの存在は無視できないことがわかった。特に、緩和後の電流と磁場が平行ではない、つまりWoltjer-Taylor理論が予測するforce-free状態ではないことがはっきりした。講演では、様々な初期条件からの緩和過程と緩和後の構造について報告する。

キーワード : 磁気流体力学、緩和現象、Yin-Yang-Zhong格子

Keywords: magnetohydrodynamics, plasma relaxation, Yin-Yang-Zhong grid

定常ペテックリコネクションから動的ペテックリコネクションへの遷移に関するシミュレーション研究

Simulation study of transition from steady Petschek reconnection to dynamical Petschek reconnection

*與那覇 公泰¹、草野 完也¹、柴山 拓也¹

*yonaha hiroyasu¹, Kanya Kusano¹, Takuya Shibayama¹

1. 名古屋大学宇宙地球環境研究所

1. Institute for Space-Earth Environmental Research

磁気リコネクションは磁気エネルギーを熱、運動エネルギーに変換する過程である。しかし、古典的な定常リコネクションモデル（Sweet-Parkerモデル）では、太陽コロナで観測された高速リコネクションを説明することができない。定常的なペテックモデルリコネクションは高速リコネクションを説明することはできるが、電流シート中に異常抵抗を局在化させる必要があることが指摘されている。一方、抵抗が空間的に一様な場合、薄い電流層の不安定性によっていわゆるプラズモイドリコネクションが生じることで、リコネクションが高速化する。近年、Shibayama et al. (2015)は、一様抵抗におけるプラズモイドリコネクションが、スローショックを伴った新しいタイプの高速リコネクションとして現れることを見出し、「動的ペテックリコネクション」と呼んだ。我々は、空間的に局在化した異常抵抗の大きさに対するリコネクションの依存性に着目し、定常ペテックリコネクションから動的ペテックリコネクションへの遷移を調べる目的で、二次元MHDシミュレーションを行った。その結果、定常ペテックリコネクションと動的ペテックリコネクションの間に、振動するペテックタイプの新たなリコネクション解があることを見出した。本研究ではその振動場を電流層に対する対称性から二つの異なるパリティ成分に分離することで、振動するペテックリコネクションの磁場構造を解析し、定常ペテックリコネクションから動的ペテックリコネクションへの解構造の包括的な理解を試みる。

キーワード：磁気リコネクション、ペテック・リコネクション、シミュレーション、スローショック

Keywords: magnetic reconnection, Petschek reconnection, simulation, slow shock

Persistence of Precursor Waves in Two-dimensional Relativistic Shocks

*岩本 昌倫¹、天野 孝伸¹、星野 真弘¹、松本 洋介²

*Masanori Iwamoto¹, Takanobu Amano¹, Masahiro Hoshino¹, Yosuke Matsumoto²

1. 東京大学大学院理学系研究科、2. 千葉大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Chiba University

The origin of high energy cosmic rays ($>10^{15.5}$ eV) has not been fully understood, and the acceleration mechanism is still controversial. Recently Chen et al. (PRL, 2002) proposed the particle acceleration by the large-amplitude Alfvén waves at gamma-ray bursts as a model of the generation of ultra-high energy cosmic rays ($>10^{18}$ eV), based on the wakefield acceleration mechanism which was initially proposed by Tajima and Dawson (PRL, 1979) in the context of laser-plasma interactions in the laboratory. The wakefield acceleration in laboratory is induced by an intense laser pulse (or transverse electromagnetic waves) propagating in a plasma. The mechanism may also operate in relativistic shocks in nature because it is known that large-amplitude electromagnetic precursor waves are excited by synchrotron maser instability driven by the particles reflected off the shock-compressed magnetic field in relativistic shocks (Hoshino and Arons, PoP, 1991). In fact, Hoshino (ApJ, 2008) demonstrated the generation of the non-thermal electrons by the wakefield induced by the ponderomotive force of the electromagnetic precursor waves in relativistic magnetized shocks by means of one-dimensional Particle-In-Cell (PIC) simulation.

The wakefield acceleration has been discussed only in one-dimensional shocks so far. It is not known very well whether or not the same mechanism can operate in more realistic multi-dimensional systems. In multi-dimensional shocks, the inhomogeneity may appear in the transverse direction of the shock, and the waves emitted from different positions at the shock may overlap with each other. Consequently, the wave coherency which is essential for the ponderomotive force may be broken and the wakefield acceleration may not occur. Another possible problem is the competition between the synchrotron maser and Weibel instability. The Weibel instability occurs near the shock front due to effective temperature anisotropy generated by the reflected particles in the shock transition region. Since both the instabilities are excited from the same free energy source, the efficiency of the precursor wave emission may be affected or even completely shut off.

To solve these subjects, we investigated in this study the properties of the precursor wave emission in relativistic shocks by using the two-dimensional PIC simulation. Since the growth rate of the synchrotron maser instability at high harmonics are significantly large, the precursor waves are high-frequency electromagnetic waves and thus may easily be damped. Therefore, our simulations were performed with high spatial resolution to resolve the precursor waves well. We observed that large-amplitude, coherent precursor waves were excited in two-dimensional shocks, and found that the amplitude of the precursor waves was large enough to induce the wakefield acceleration even if the Weibel instability occurs. In addition, the amplitude of the precursor wave remains finite and has reached a quasi-steady state by the end of the simulation. In this presentation, we quantitatively evaluate the efficiency of the precursor wave emission in both one-dimensional and two-dimensional shocks, and then discuss the possibility of the wakefield acceleration model for the production of non-thermal electrons in an astrophysical shock.

キーワード：粒子加速、無衝突衝撃波、宇宙線

Keywords: acceleration of particles, collisionless shock, cosmic rays

デカメータ電波パルスの観測に基づき我が銀河系中心に発見された巨大ブラックホール・バイナリーの存在の確証

Verification of Super Massive Black Hole Binaries Discovered at the Center of Our Galaxy by Observations of Decameter Radio Wave Pulses

*大家 寛¹

*Hiroshi Oya¹

1. 東北大学理学研究科地球物理学専攻

1. Department of Geophysics Graduate School for Science Tohoku University

序 本研究では主として、東北大学デカメータ電波長距離干渉計システムを用い、我銀河系中心部のデカメータ電波パルス観測を実施してきていて、1984年、電波源が巨大ブラックホールにあることを認めた。その後1999年の時点では、その周期が最長130secから最短0.3secに至る23系列、したがってほぼ周期に比例する質量比をもつ巨大ブラックホールから中間質量ブラックホールにいたる、23個以上のブラックホール群を提唱することもあった。2010年以降再観測を実施し、特に、2014年からデジタル方式干渉計へと改良し2016年には本格的追試観測に入り、周期20sec以上のパルス電波源と対応する巨大ブラックホール群について精査した。その結果従来の提言を大幅に修正することとなった

2. 観測 今回、東北大学長距離基線デカメータ電波干渉計観測は、2016年2月2日より28日にわたる、銀河中心部の出現前と2016年3月15日から6月30日にわたる銀河中心部の直接観測期間に実施した。干渉計の観測点はYoneyama, Zao、およびKawataniの3局よりなり、最長83km,最短44kmの3基線が設定されるが、21.860MHzにて全帯域幅1kHzで観測された受信信号は仙台局にテレメータ伝送される。各信号は900Hz, 1000Hz および1100Hzにおいて帯域幅100Hzの狭帯域信号に分割され、各々サンプリングレート3 kHzでA/D変換された後干渉データとして処理される。

3. パルス周期探索のためのFFT解析 干渉計処理後のデータは到来方位決定のため方位検出用テンプレート・フリンジと相関を取ったのち周期10secから8200secにわたりFFT解析を実施し、背景雑音の0.1%から1%のパルス成分を抽出している。解析結果から対象とするパルス群は銀河系中心部の出現と明確に対応し ± 0.5 度の精度で我が銀河系中心に源を持つことが確証された。パルス群を示すスペクトルは基底スペクトルの中心がGaaに対する156.6secとGabに対する130.8secにあり、それぞれ第3高調波まで展開していてそれぞれに2200secの周期変調(周波数変調)があり、中心スペクトルの上下にそれぞれ(1/2200)Hzの周波数変調を反映する3~5個の側帯波スペクトルの存在を示して、GaaとGabは互いに2200secで公転するバイナリーを構成していると結論された。

4. シミュレーション結果との対比 ここで、本研究では、円軌道視線速度を光速の16%と仮定しGaaおよびGabは同レベルの強度で、それぞれの基底スピン周期から、第2、第3高調波までのパルス電波を放射するとした正弦波群からなる関数に対しFFT解析を試みたが、シミュレーション結果と観測データのFFT解析結果は良く一致した。この結果は従来5組のそれぞれ異なる周期変動を持つバイナリー系としてきた仮定が大幅に修正され、巨大ブラックホール・バイナリーのうち最大級の1対のみ存在し、その他には中間質量ブラックホールが存在するという結果となった。

5. 同期相関解析(Box Car法解析)によるパルス波形および軌道運動の確認 FFT解析で得られたスペクトルによって示される周期を起点にその変化率 4×10^{-5} のステップで周期探索をしつつ干渉計出力の時系列

データに対し周期同期相関法でパルス波形の検出を行った。本研究ではGaaおよびGabの公転運動に伴って起こるドップラー効果に基づく周期変動に同期した周期変動型のBox Car法を新たに開発して実施している。従って完全な同期相関を実現するにはGaa及びGabの固有スピン周期の探索と並行して公転周期、軌道運動速度、公転軌道上の位置情報（周期変動関数の位相）を探索する必要がある。解析の結果、公転周期のより詳細な周期は2205secで公転軌道は円軌道に近く観測されるGaaおよびGabに対し観測される電波源位置は赤道域を中心とする低緯度とされるが、直接可視領域と共役的にブラックホールの裏側が同時観測されることが判明した、この裏側に出現する共役点は自転するKerブラックホールの周辺を取り巻くErgo-sphereの回転空間においてRay Pathがスパイラル状に曲げられることによって生ずる現象として理解される。

6. 結論 本研究の結果、従来報告してきた5組以上のブラックホール・バイナリー群の存在は否定され、これまでGaaとGabと命名してきた1対のブラックホール・バイナリーの存在に収斂することが判明した。得られたパラメータにKepler-Braheの法則を適用するとGaa,およびGabの公転速度が0.16cおよび0.19cの場合質量はそれぞれ168万および140万太陽質量となる。

キーワード：ブラックホールバイナリー、銀河中心、デカメートル波電波
Keywords: Black Hole Binary, Galaxy Center, Decameter Radio Wave

Fast magnetic reconnection onset for different equilibrium configurations: from analytical results to 3D simulations

*Fulvia Pucci¹, Marco Velli², Ganapati Sahoo³, Anna Tenerani², Luca Biferale³

1. National Institute for Fusion Science (NIFS), 2. UCLA, 3. UNITOV

We investigate the onset of fast magnetic reconnection starting from equilibrium configurations relevant for astrophysical as well as for laboratory plasmas, that differ from the simple Harris current sheet configuration. In particular we present an analytical as well as a numerical study of the linear instability for equilibrium magnetic fields which go to zero at the boundary of the domain and of a double current sheet system, the latter previously studied as a proxy for the $m=1$ kink mode in cylindrical plasma. We show how the "ideal" tearing trigger condition is changed by assuming such different equilibrium profiles. Finally we present results for incompressible 3D MHD simulations of a double current sheet, in triperiodic geometry. We examine and contrast the destabilization and transition to turbulence describing the evolution of the magnetic energy and dissipation, and possible application to heliospheric phenomena, in particular CME evolution and relaxation.

Keywords: plasma physics, space plasma, magnetic reconnection

High-order leapfrog scheme of the Vlasov-Ampère system for the electrostatic plasma

*Tsung-Che Tsai¹, Ling-Hsiao Lyu², Wen-Chieh Hsieh²

1. National Center for High-performance Computing, National Applied Research Laboratories, 2. Graduate Institute of Space Science, National Central University

The simulation result of Vlasov code has high signal-to-noise ratio, in comparison to PIC (particle-in-cell) code. In the past, due to the scarcity of computing power, most researchers use PIC code as a tool toward novel explorations and investigations. With the rapidly enhancement in computing power of supercomputers, the high resource-demanding Vlasov simulation of potency has become wildly adoptable and efficiently achievable. In this study, we adopt grid-base Eulerian solver, instead of the customary semi-Lagrangian method, to solve Vlasov-Ampère equations for electrostatic plasma. We use three-step high-order leapfrog scheme for the solutions of energy-conserving Vlasov-Ampère equations. We use fifth-order central finite difference method to calculate the first derivative in Vlasov equation along the real space. We use cubic spline method to calculate the first derivative and integration along velocity space in the Vlasov equation and Ampère law without magnetic field, respectively. We use forth-order leapfrog method for time stepping. Subsequently, we examine the correctness of grid-base Eulerian solver in solving Vlasov-Ampère equations for electrostatic plasma by linear Landau damping test.

Keywords: Vlasov simulation, electrostatic plasma

Evaluation of Numerical Properties of Constrained-Transport-Type Schemes for Hybrid Simulations

*天野 孝伸¹

*Takanobu Amano¹

1. 東京大学 地球惑星科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

Numerical simulations of space and astrophysical plasmas need an accurate method for solving Maxwell's equations. The divergence-free property of the magnetic field is the fundamental constraint in the system that must be satisfied in a numerical solution because otherwise, the simulation will become unstable. The Constrained-Transport (CT) scheme, which exactly preserves the discrete divergence-free property, has been quite successful in numerical Magnetohydrodynamics (MHD). In recent years, the CT scheme for Maxwell's equations has been ingeniously combined with an HLL-type (Harten-Lax-Van Leer) Riemann solver for the hydrodynamics part in a consistent fashion. The scheme known as the HLL-UCT shows excellent performance in numerical MHD as well as two-fluid plasma simulations.

It is straightforward to apply the same technique to kinetic Particle-in-Cell (PIC) type simulation method. However, the numerical properties of the scheme as applied to kinetic simulations are not known very well. In fact, artifacts arising from numerical noise inherent in the PIC method (which is absent in a grid-based fluid code) should carefully be analyzed.

In this study, we apply the HLL-UCT scheme to a quasi-neutral plasma hybrid code in which ions are treated as kinetic macroparticles whereas electrons are assumed to be a fluid. We found that naive application of HLL-UCT to a hybrid code may lead to artificial heating and/or cooling of ions, presumably because of excessive dissipation in the HLL-UCT scheme. We thus quantify the numerical artifact by extensive numerical experiments with varying mesh size, the number of particles per cell, plasma beta, etc. We found that the numerical heating/cooling may be explained by absorption (or dissipation) of spontaneous emission of waves arising from a discrete particle effect. Practical workarounds to minimize the numerical artifact for long time simulations will be discussed.

キーワード：マクスウェル方程式、数値シミュレーション、プラズマ

Keywords: Maxwell's equations, numerical simulation, plasmas

Designing high-order finite difference scheme for magnetohydrodynamics: shock capturing and divergence-free conditions.

*簗島 敬¹、三好 隆博²

*Takashi Minoshima¹, Takahiro Miyoshi²

1. 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野、2. 広島大学 大学院理学研究科

1. Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Graduate School of Science, Hiroshima University

Space and astrophysical plasmas are rich in dynamic phenomena such as convection, eruption, shock, accretion, and so on. Their macroscopic dynamics is well described by magnetohydrodynamics (MHD). Since the system of MHD equations are highly nonlinear, a numerical simulation is an indispensable tool to reveal its complicated physics.

The plasma is frequently associated with supersonic flows such as the coronal mass ejection, supernova, and jet, which yield various shocks and discontinuities. Furthermore, these flows are almost inviscid, thus will become turbulent. Reliable MHD simulations need to resolve these phenomena simultaneously, which is a contradictory issue for computational fluid dynamics and thus is challenging. Moreover, the MHD simulation should carefully handle errors of the divergence for magnetic field, which is not necessarily free in numerical simulations.

Many works have been devoted to develop exact or approximate Riemann solvers (upwind schemes) for (M)HD to accurately capture shocks and discontinuities. Nowadays, such shock capturing schemes are adopted as a standard method for MHD simulations (Kritsuk et al. 2011). On the other hand, various high-order interpolation techniques are proposed to improve the resolution of small scale structure (e.g., turbulence), and they can be incorporated into shock capturing schemes.

Shock capturing schemes are based on the finite volume method, which automatically satisfies the conservation laws but has a difficulty in achieving high order of accuracy in multi-dimension. The finite difference method is rather convenient for designing multidimensional high-order scheme. Conservative finite difference schemes have been proposed by approximating fluxes to high order, and succeeded in high resolution MHD simulations (Jiang et al. 1999; Mignone et al. 2010).

We consider another type of the conservative finite difference scheme for MHD, which interpolates physical variables to high order and utilize a variety of Riemann solvers to capture shocks. We also take special care of the divergence-free condition for magnetic field. Combination of the upwind scheme and the constrained transport (UCT) method, which satisfies divergence-free condition within machine accuracy without violating upwind property (via Riemann solvers), is thought to be a powerful strategy especially for low beta plasmas. We test various type of the UCT method. In this paper, we will present details of our code design and its performance, especially focusing on the comparison among different interpolation techniques, Riemann solvers, and UCT methods.

キーワード：磁気流体シミュレーション、数値計算手法

Keywords: MHD simulation, Numerical method

1次元静電ブラソフシミュレーションによる電離圏観測ロケットウェイク近傍の電子速度分布の検討

Study of anisotropic electrons distributed around the wake of an ionospheric sounding rocket by a 1D Vlasov-Poisson simulation

*遠藤 研¹、熊本 篤志¹、加藤 雄人¹

*Ken Endo¹, Atsushi Kumamoto¹, Yuto Katoh¹

1. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1. Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

電離圏観測ロケットは電離圏大気中を超音速で運動するため、その後方に航跡（ウェイク）と呼ばれる低プラズマ密度領域を形成する。ロケットのウェイク中では、ウェイク中のUHR周波数やプラズマ周波数、Zモードカットオフ周波数付近の周波数帯でプラズマ波動が観測されることがYamamoto[PhD. thesis, Tohoku University, 2001]によって報告されている。その後、Endo et al. [JGR, 2015]では、S-520-26ロケット実験でのプラズマ波動観測データをもとに、その波動のモードが短波長の静電波（静電的電子サイクロトロン高調波（ESCH）、UHRモード波動）であると結論された。この波動は、同実験で観測されたホイッスラーモード帯の波動とともに、ロケットのスピント位相に応じた強度変化を示していた。この結果は、速度空間上で異方性をもつ電子がロケット周囲のウェイクに対応した空間分布をもち、それに応じてそれぞれのプラズマ波動が励起・成長していたことを示唆している。しかし、ウェイク内外においていかなる速度分布のプラズマがどのような空間分布で存在していたかについては未だ明らかになっていない。

そこで我々は、ウェイク近傍における速度分布関数の空間分布について考察するため、一次元空間に設定した低密度領域の両側から背景の高密度プラズマが流れ込む現象を模擬するシミュレーションコードを開発している。磁力線方向の一次元空間を仮定し、空間範囲は $-600\lambda_D \leq X \leq 600\lambda_D$ (λ_D : デバイ長) とする。ここで、空間のグリッド幅は $\Delta X = \lambda_D$ とする。初期の真空領域は $-25\lambda_D \leq X \leq 25\lambda_D$ に設定する。また、粒子の運動は磁力線方向一次元のみを解き、電子の速度空間範囲は $-10V_{the} \leq V_e \leq 10V_{the}$ (V_{the} : 電子熱速度)、イオンの速度空間範囲は $-15V_{thi} \leq V_i \leq 15V_{thi}$ (V_{thi} : イオン熱速度) として取り扱う。速度空間のグリッド幅は、電子は $\Delta V_e = 0.1V_{the}$ 、イオンは $\Delta V_i = 0.0025V_{the}$ とする。シミュレーションの時間ステップ Δt は、 $\Delta t = 0.1\omega_p^{-1}$ (ω_p : プラズマ周波数) として計算する。そのため、計算を安定に解くためのクーラン条件は、電場を E と表すと $E/E_0 \leq 1$ ($E_0 = \lambda_D \omega_p^2 m_e / e$, m_e : 電子質量, e : 電気素量) となる。計算機で解く方程式は、電子・イオンのブラソフ方程式及び電場を決定するポアソン方程式に限定する。速度分布関数の時間発展は有理関数CIP法[Xiao et al., CPC, 1996]、電荷の分布に対応した電場の分布はフーリエ変換を利用した方法[Birdsall and Langton, Taylor & Francis Group, 2008]で求める。シミュレーションで再現される粒子の速度分布関数及び電場の時間変化は、それらのウェイク軸方向の空間分布とみなす。

現在の設定では、ウェイク境界のすぐ外側に、時間とともに振幅が増大する電場振動が現れ、 $t = 469\Delta t$ (下流3.4mm相当) でクーラン条件が破られるため、それ以降の計算は行っていない。しかし、本研究では少なくともウェイク尾部（下流約0.4m）付近までの速度分布関数の議論が必要と考えており、電場振動の選択的減衰、初期ウェイク境界の密度勾配の緩和等の対策を検討している。電子の速度分布異方性に関しては、現コードの $t < 469\Delta t$ の範囲でも現れており、ウェイク内側ではマルチビーム型の電子速度分布関数が、ウェイク境界外側では単一のビーム型分布関数が得られている。前者はウェイク外から内側に向かって電場振動に伴って周期的に流れ込む電子によって、また、後者はウェイク外側から内側に流れ込もうとする電子が境界の分極電場により反射されることによって起きていると考えられる。

本発表では、シミュレーションの設定や手法について概要を説明し計算結果を報告するとともに、特に電子

速度分布関数の空間分布やそれがつくられる物理過程に焦点を当て、議論を行う。

キーワード：ウェイク、観測ロケット、静電ブラソフシミュレーション、速度分布関数、電離圏

Keywords: wake, sounding rocket, Vlasov-Poisson simulation, velocity distribution function, ionosphere

極域電離圏飛翔体周辺のプラズマじょう乱に関する粒子シミュレーション Particle Simulations on Near-Spacecraft Plasma Perturbations in Polar Ionospheric Environment

*三宅 洋平¹、佐々木 紫²、臼井 英之²

*Yohei Miyake¹, Yukari Sasaki², Hideyuki Usui²

1. 神戸大学計算科学教育センター、2. 神戸大学大学院システム情報学研究科

1. Education Center on Computational Science and Engineering, Kobe University, 2. Graduate School of System Informatics, Kobe University

本発表では、神戸大学とノルウェー・オスロ大学の連携により進められている、極域飛翔体－電離圏プラズマ相互作用の数値シミュレーション研究について報告する。極域電離圏カスプ領域では、様々な空間スケールをもつプラズマ密度の疎密構造（イレギュラリティ）が形成されることが知られる。ノルウェーでは当該現象の本質的な解明のため、ICIキャンペーンと呼ばれる一連のロケット実験を実施してきた。しかし飛翔体周辺に生じるウェイクやシースといったプラズマじょう乱が飛翔体による「その場」観測に及ぼす影響は、十分に理解されているとはいいがたい。本研究では、衛星プラズマ相互作用の数値解析で実績のある3次元のプラズマ粒子シミュレーション手法を当該課題に適用し、観測ロケットや低軌道衛星周辺のプラズマ環境じょう乱の発生メカニズムを解明することを目標とする。

これまでに①ロケット表面帯電の磁力線方向とスピン軸のなす角に対する依存性や、②電離圏プラズマ電子の磁化に起因するロケット／衛星ウェイク構造の非対称性、を確認するとともに、それに関連した飛翔体周辺での電子ダイナミクスに関して新たな知見を得た。特に衛星近傍では、シース電場と背景磁場で決定されるE×Bドリフトの他に、シース内の密度勾配に起因する反磁性効果に基づく環状電流が存在する可能性が示唆された。現在は、衛星電位やウェイク周辺領域の空間電位に見られる固有振動と、プラズマ波動モードの関連を解明するための調査を開始しており、その初期結果も報告する。

キーワード：極域電離圏プラズマ、観測ロケット、衛星帯電、ウェイク、プラズマ粒子シミュレーション

Keywords: Polar Ionospheric plasma, sounding rocket, spacecraft charging, wake, PIC simulation

プラズマ波動電界による人工衛星電位変動現象の数値モデリング

Numerical Modeling of Plasma Wave Electric Field Effects on Spacecraft Charging

*三宅 洋平¹、桐山 武士³、加藤 雄人²、臼井 英之³

*Yohei Miyake¹, Takeshi Kiriya³, Yuto Katoh², Hideyuki Usui³

1. 神戸大学計算科学教育センター、2. 東北大学大学院理学研究科、3. 神戸大学大学院システム情報学研究科

1. Education Center on Computational Science and Engineering, Kobe University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University, 3. Graduate School of System Informatics, Kobe University

本研究では、プラズマ波動の時間変動電界中の人工衛星電位変動現象をプラズマ粒子シミュレーションにより再現する。バンアレンプローブによる最近の観測ではコーラス波動の検出と同時刻に衛星電位の変動が確認されており[e.g., Malaspina et al., 2014]、波動電界による光電子放出電流の変動が原因と予想されている。これまでに本現象の波動周波数や背景磁場強度に対する依存性がチャンバー実験により調査されている[Wang et al., 2014a; 2014b]が、同時に波動の偏波や衛星形状による影響など理解が十分でない点も指摘されている。また衛星電位の計測は、衛星筐体とプローブ間の電位差を測ることにより行われるため、本現象を正しく理解するためには、衛星筐体とプローブ電位それぞれの波動電界に対する応答（の違い）を考慮する必要がある。

本発表では、これらの問題に関して、プラズマ粒子シミュレーションを用いた数値研究経過を報告する。ここで対象とするVLF波動の典型的な波長スケールは衛星サイズより十分に大きい。したがって波動電界は空間的に一様な交番電界であるとして、シミュレーション空間中に印加した。この計算モデルにより、右回り円偏波を持つ波動電界に対して、光電子電流の変調とそれに起因する衛星電位変動を再現することに成功した。また高周波シースの理論[Boehm et al., 1994]を応用する形で、本現象の理論的なモデル化も開始している。初期結果として、波動電界強度が200 mV/m以下のシミュレーション結果を良く説明できる定式化を得た。

キーワード：プラズマ波動、衛星帯電、波動電界、コーラス波動、光電子放出、プラズマ粒子シミュレーション

Keywords: plasma wave, spacecraft charging, wave electric field, chorus waves, photoelectron emission, particle-in-cell simulation

BEN低周波成分に関する3次元電磁粒子シミュレーション 3D Electromagnetic Particle Simulations about the Low Frequency Component of BEN

*三宅 壮聡¹、佐治 昌哉¹、岡田 雅樹²、大村 善治³

*Taketoshi Miyake¹, Masaya Saji¹, Masaki Okada², Yoshiharu Omura³

1. 富山県立大学工学部情報システム工学科、2. 国立極地研究所、3. 京都大学生存圏研究所

1. Department of Informatic system, Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University, 2. National Institute of Polar Research, 3. Research Institute of Sustainable Humanosphere, Kyoto University

これまでに、BENの低周波成分が、その高周波成分であるESWと同様にビーム不安定性の非線形発展の結果励起されるという仮定に基づき、ビーム不安定性からの低周波波動励起に関する2次元粒子シミュレーションを行った。その結果、磁場に垂直方向のイオン温度と低周波波動との関係は見られたが、ビーム不安定性とBENの低周波成分との明確な関係は確認できなかった。そこでGeotail衛星に搭載されている電場観測機(EFD)によって観測されたBENの低周波成分について統計解析を行い、BENの発生しやすい磁場強度とイオン密度・イオン温度の関係を調査した。BEN低周波成分をスペクトル形状によって分類して解析したところ、BEN低周波成分のスペクトルには異なる2パターンが存在することがわかった。それぞれのスペクトルを持つBEN低周波成分が観測される条件について統計解析を行い、特定されたプラズマパラメータを初期条件とする3次元電磁粒子シミュレーションを行った。その結果、どちらの条件でも低周波波動の励起が確認された。しかし現在のシミュレーションはコードの制約から時間・空間的に十分な規模では無いため、確認された低周波波動が安定に発達するかは不明である。今後はシミュレーションコードを改良して、十分な時間・空間規模のシミュレーションを実行し、BEN低周波成分の励起メカニズムを解明する。

キーワード：広帯域静電ノイズ、3次元電磁粒子シミュレーション、Geotail衛星

Keywords: Broadband Electrostatic Noise, 3-dimensional Electromagnetic Particle Simulations, Geotail Spacecraft