

無衝突降着円盤における温度異方性の緩和と磁気回転不安定性の発展 Relaxation of pressure anisotropy and the evolution of Magneto Rotational Instability in collisionless accretion disk

白川 慶介^{1*}, 星野 真弘¹

Keisuke Shirakawa^{1*}, Masahiro Hoshino¹

¹ 東京大・理・地惑

¹Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo

Magneto-Rotational Instability (MRI) is a plasma instability which is considered to take place in a magnetized differentially rotating astrophysical disks. It was first proposed by Velikhov in 1959 and later by Chandrasekhar in 1960. Its importance in astrophysical rotating disk was pointed out by Balbus and Hawley in 1991. This instability can generate MHD turbulence within a few periods of orbit and can generate a strong turbulent viscosity. Thus this instability is considered to play a major role in the context of accretion which requires a strong viscous effect to transport angular momentum in the disk.

These nonlinear behaviors of MRI, such as generation of turbulence or accretion due to the strong turbulent viscosity, are mainly studied by numerical simulations under MHD approximation which assumes the plasma as a single component fluid. However, recent analytical and numerical studies have shown that kinetic effects can be important on the evolution of MRI in dilute accretion disks which are often found around black holes. These studies have mainly focused on the effect of pressure anisotropy and results from the linear theory indicates that initial pressure anisotropy may severely affect the evolution of MRI. Since these studies were carried out with Landau fluid closure, relaxation process of ion pressure anisotropy was included by so-called "Hard Wall approximation".

In this study, we newly developed a hybrid code in a local differentially rotating system, including the process of ion's pitch angle scattering in a self consistent manner. From the results, we find a relaxation of pressure anisotropy by effective pitch angle scattering during the evolution of MRI. In this presentation we would like to focus on the effect of initial pressure anisotropy on the evolution of MRI.

キーワード: 無衝突プラズマ, 降着円盤, 磁気回転不安定性

Keywords: Collisionless Plasma, Accretion disk, Magneto Rotational Instability

X-line retreat 時における outflow の構造 The structure of an outflow during an X-line retreat

清水 健矢^{1*}, 藤本 正樹², 篠原 育²
Kenya Shimizu^{1*}, Masaki Fujimoto², Iku Shinohara²

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

¹University of Tokyo, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

磁気リコネクションは、プラズマ粒子の加速や熱化を伴って磁力線がつなぎかわる現象である。特に地球磁気圏尾部のような非対称磁場中の磁気リコネクションでは、一方の outflow が他方の outflow に比べて磁場の壁に阻まれることによって、X-line が尾部方向にゆっくりと移動することが知られている (X-line retreat)。しかし、この retreat 時における outflow の構造についてはまだよく知られていない。そこで我々は、Particle-in-cell 法を用いて、非対称磁場における磁気リコネクションの outflow 構造と、周期境界条件下で、複数の異なる大きさのボックスサイズにおける磁気リコネクションの outflow 構造とを比較した。それによって、非対称磁場中で X-line retreat が起こっているときの電子の outflow 速度構造が、周期境界条件下で共通して見られるリコネクション率を維持するために必要最低限の電子の outflow 速度構造と対応していることが分かった。これは X-line retreat がリコネクション率を維持するために起こっていることを意味している。さらに、非対称リコネクションにおける outflow 速度構造のイオン-電子質量比依存性についても検証した。この研究により、現実のイオン-電子質量比での X-line retreat 時における磁気リコネクションの構造を具体的に予想することができる。

キーワード: 磁気リコネクション

Keywords: magnetic reconnection

高磁気レイノルズ数プラズマにおける磁気リコネクションのシミュレーション研究 Simulation study of magnetic reconnection in high Raynols number plasma

中坊 孝司^{1*}, 草野 完也¹, 三好 隆弘², Grigory Vekstein³
Takashi Nakabou^{1*}, Kanya Kusano¹, Takahiro Miyoshi², Grigory Vekstein³

¹ 名大 STEL, ² 広大理, ³ Manchester Univ.

¹ STEL, Nagoya Univ., ² Hiroshima Univ., ³ Manchester Univ.

磁気リコネクションは宇宙及び実験室プラズマにおける磁気エネルギーの解放機構として重要な物理プロセスである。磁気リコネクションの基本的なメカニズムは Sweet や Parker によって提案されたように、薄い電流層における磁気拡散に支配される。彼らのモデルに従えばリコネクション率は磁気レイノルズ数 (S) の平方根に反比例しなくてはならない。しかし、磁気圏や太陽コロナにおいては磁気レイノルズ数が非常に大きい ($S > 10^{12}$) にも関わらずリコネクション率が 10^{-2} 程度の高速リコネクションが生じることが観測されている。そのメカニズムについてはこれまでスローショックの効果や Hall 項の影響などに基づいたモデルが提案されているが、それぞれの効果がどのような条件で現れるのかは未だに十分理解されていない。Sweet や Parker の理論では電流層が安定であることが仮定されているが、最近では磁気レイノルズ数が大きくなると、電流層そのものが不安定化する結果としてリコネクションが加速化することが指摘されている。

Lapenta(2008) では磁気レイノルズ数をパラメータとし、電流層不安定が起こるリコネクションの発達過程を調べている。結果として、磁気レイノルズ数が高い程、電流層が不安定になるタイミングが遅くなることが分かった。しかし、磁気レイノルズ数の値は 10^3 と 10^4 しか調べられておらず、更に高い値での計算はされていない。また初期に与える磁場の擾乱の大きさも変化させていないため、不安定が起こるパラメータの閾値についてはまだ検証の余地が残っている。

本研究では高磁気レイノルズ数領域においてリコネクションを加速するメカニズムを、精密な電磁流体力学 (MHD) シミュレーションを実施することにより特定することを目指す。

カレントシートが厚さがイオン慣性長に近づいた時にリコネクションの加速に寄与する要因を特定するためには、高精度のスキームが必要である。このため、Miyoshi & Kusano (2005) によって開発された HLLD Riemann solver による 2 次元 MHD コードを利用した数値シミュレーションを名大 STE 研のスーパーコンピュータを用いて実施した。HLLD Riemann solver は近年、MHD 方程式の数値解法の世界的標準として認められつつある高効率高精度アルゴリズムであり、従来の解法では解けなかった不連続を精密に解くことができる。

本発表では、2 次元平面上で平衡状態 (ハリス平衡) を考え、磁場の擾乱成分と一様な電気抵抗を与えた時の磁気リコネクションの発達過程について、磁場擾乱の振幅と波長、磁気レイノルズ数をパラメータとした計算結果を報告する。また、結果からリコネクションの高速化と電流層における 2 次不安定性の関係について議論する。

磁場のソレノイダル条件を満たす高精度MHDシミュレーションコードを用いた磁気リコネクション関連問題の検証

Validation of a newly developed divergence-free high-resolution MHD code against magnetic reconnection related problems

大山 裕介^{1*}, 河合 宗司², 藤本 正樹²

Yusuke Ohyama^{1*}, Soshi Kawai², Masaki Fujimoto²

¹ 東京大学大学院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

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

大規模系における非定常3次元リコネクションを理解するためには、非定常な圧縮性MHD乱流の様相を正しく捉えた上で、詳しく解析するというアプローチがある。そのためには、高精度MHDコードでMHD乱流を再現し、且つその中で動的に発展するXポイントの振る舞いも再現する必要がある。これまでの研究では、MHD近似において一様な電気抵抗を仮定すると高速磁気リコネクションは再現できないとされ、高速リコネクションのためには少なくともホールMHD近似を用いる必要があるとされた。

本研究では、高精度のMHDシミュレーションコードによって高速磁気リコネクションを再現し、またXポイントの動的な振る舞いを再現する課題にも挑戦した。ここで用いるMHDコードは、物理的に散逸効果が生じるところのみに散逸を効かせ、それ以外の場所では高精度の理想MHDダイナミクスを実施するものである。

結果は以下の通りである。

(1) GEM磁気リコネクションチャレンジ問題では、高速磁気リコネクションの発生を確認した。

(2) 3つのXポイントが並んでいるケースでは、それぞれでの磁気リコネクションがしばらく継続した後、真ん中のXポイントでは逆向きの磁気リコネクションが進み、二つの磁気島は合体して一つになる。その後、両端にあるXポイントは相互作用を起こし、磁気島の成長に伴いより外側にスライドする様子が得られる。

これらはいずれも粒子計算で見られたもので、高精度MHDコードが当初の課題をクリアしたことを示す。但し、Xポイントの動的な振る舞いに関しては、今後とも検証例を増やす必要がある。

宇宙プラズマダイナミクスを記述する究極の体系のひとつとして、運動論的效果を取り込んだ高精度MHDコードということが考えられる。今回の結果は、その開発に向けての第一歩であるとも言える。

キーワード: 磁気リコネクション, MHD シミュレーション

Keywords: magnetic reconnection, MHD simulation

三次元非対称磁気リコネクション Three-dimensional asymmetric magnetic reconnection

竹内 智^{1*}
Satoshi Takeuchi^{1*}

¹ 山梨大学生命環境学部
¹ Faculty of Life and Environmental Science, University of Yamanashi

A kinetic model of asymmetric magnetic reconnection in three-dimensional space is analyzed theoretically and with numerical calculations. Consider the case where the two magnetized plasmas are colliding each other; for example suppose that the plasma shock is propagating through the uniform background plasma.

In order to provide a clear understanding of the magnetic reconnection presented here, we show a simple representation of the model with the cartoon in Fig.1. *Plasma A* is the stationary plasma whose magnetic field is given by B_1 . *Plasma B* is propagating with the velocity v_s in the positive y direction. The electric field of this plasma is given by $E_2=(v_s/c)B_2$ (c being the velocity of light). The magnitude of the field is smaller than that of the field B_1 , i.e., $B_1 < B_2$. The crossing angle is defined as the angle between the fields B_1 and B_2 . This angle plays an important role in generating the magnetic neutral sheet. If the crossing angle is greater than a right angle, then the magnetic neutral sheet is created in front of the shock. The resonant particle interacting with the shock is trapped by the neutral sheet. Accordingly such the particle is accelerated by the electric field E_2 in the neighborhood of the neutral sheet. If the angle is nearly equal to a right angle, the direction of the acceleration is almost the same as the direction of the magnetic field B_1 . The reason is that the direction of the electric field is almost the same as the direction of the field B_1 . This is the way of the field-aligned acceleration presented by the author [1]. If the crossing angle is smaller than a right angle, then the magnetic neutral sheet is not created. Therefore the effective energy gain of the particle cannot be expected.

[1] S. Takeuchi, Phys. Plasmas 19, 070703 (2012).

キーワード: 非対称磁気リコネクション, 粒子加速, プラズマ衝撃波

Keywords: asymmetric magnetic reconnection, particle acceleration, plasma shock wave

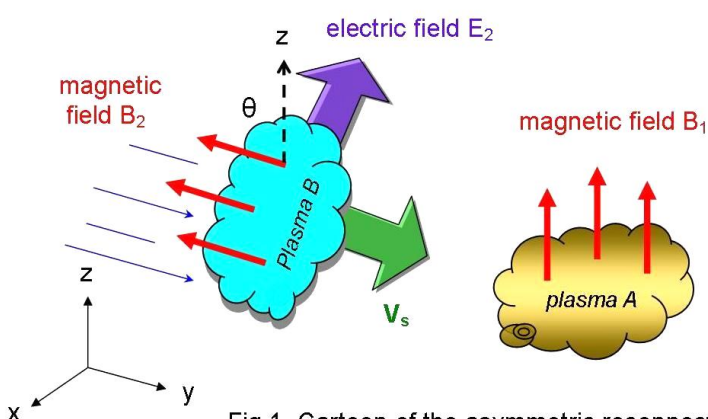


Fig.1 Cartoon of the asymmetric reconnection

ランダウ流体近似による無衝突磁気リコネクション Collisionless magnetic reconnection under the Landau fluid approximation

平林 孝太^{1*}, 星野 真弘¹

Kota Hirabayashi^{1*}, Masahiro Hoshino¹

¹ 東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻

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

Magnetic reconnection has been widely researched as a mechanism of generation of hot and fast plasma flow by releasing magnetic energy stored in a system. Especially, the reconnection accompanied by slow shocks around a localized diffusion region, so-called Petschek type reconnection, is regarded as important from the point of view of the rate for magnetic energy release. In collisionless plasmas, however, the knowledge of this type of fast reconnection is not enough now.

In general, it is known that ions are accelerated along magnetic field lines from a diffusion region. Due to this beam component, the distribution function of ions is largely distorted and the temperature along the magnetic field is enhanced. Although PIC or hybrid simulations have been performed to solve the effect of the beams self-consistently, the results do not indicate the clear evidence for generation of slow shocks predicted by Petschek's theory.

In our research, as an intermediate picture between the ordinary isotropic MHD approximation and the kinetic theory, we performed a series of fluid simulations by using the double adiabatic limit and the Landau closure model. We investigated the effect of the pressure anisotropy and the Landau damping on global dynamics of magnetic reconnection.

Under the fluid approximation, the parallel pressure is enhanced across the slow shock since mirror motions are accelerated with the deformation of magnetic flux tubes. The structure downstream is greatly different from the isotropic MHD case, and the outflow region becomes wider. In this talk, we report the detail of the structure formation.

キーワード: 磁気リコネクション, 無衝突プラズマ, ランダウ流体

Keywords: magnetic reconnection, collisionless plasmas, Landau fluid

非対称磁気リコネクションの運動論シミュレーション Kinetic modeling of asymmetric reconnection

銭谷 誠司^{1*}, Michael Hesse², Masha Kuznetsova²
Seiji Zenitani^{1*}, Michael Hesse², Masha Kuznetsova²

¹ 国立天文台, ² アメリカ航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター

¹NAOJ, ²NASA Goddard Space Flight Center

At dayside magnetopause, magnetic reconnection takes place between the terrestrial dipole field and the solar-wind magnetic field. In such a configuration with asymmetric upstream conditions, reconnection behaves differently from the standard symmetric reconnection in the magnetotail. Since the upcoming MMS mission will extensively probe dayside magnetopause during its first phase, it is of immediate importance to understand key properties of asymmetric reconnection. In the MHD regime, the CSB (Cassak-Shay-Birn) theory is very successful to approximate reconnection properties with asymmetry. However, in the kinetic regime, recent simulations have reported that the reconnection rate is substantially lower than the CSB prediction. We investigate the anomalous slow-down with particle-in-cell simulations. This is attributed to the kinetic dissipation mechanism around the electron-scale dissipation region. In this contribution we discuss the electron motion near the dissipation region, its impact on the global reconnection rate, and the influence of the guide-field geometry.

キーワード: 磁気リコネクション, 運動論, 散逸メカニズム, マグネトポーズ

Keywords: Magnetic reconnection, Kinetic simulation, Magnetic dissipation, Magnetopause

不均衡なアルヴェン乱流の非線形減衰 Nonlinear dissipation of the imbalanced Alfvenic turbulence

成行 泰裕^{1*}, 羽田 亨², 坪内 健³
Yasuhiro Nariyuki^{1*}, Tohru Hada², Ken Tsubouchi³

¹ 富山大・人間発達, ² 九大・総理工, ³ 東大・地惑

¹Faculty of Human Development, Univ. Toyama, ²ESST, Kyushu Univ., ³Graduate School of Science, Univ. Tokyo

Nonlinear evolution of Alfvenic turbulence is a fundamental process in the solar wind magnetohydrodynamic (MHD) turbulence. The past observational studies suggested that the MHD turbulence close to the sun is the "slab" fluctuation, where the wave number vector is parallel to the ambient magnetic field, while the "2D" fluctuation, where the wave number vector is perpendicular to the ambient magnetic field, becomes dominant with increasing heliocentric distance. However, the energy transfer process from the "slab" fluctuation to the "2D" fluctuation is still unclear. In the present study, we numerically discuss the nonlinear evolution of the "imbalanced (high cross helicity)" Alfvenic turbulence by using a two-dimensional ion hybrid code. The dissipation processes related to the ion kinetics are demonstrated.

キーワード: 太陽風, 磁気流体乱流
Keywords: solar wind, MHD turbulence

かに星雲の問題と大振幅電磁波のパラメトリック不安定性によるエネルギー散逸 Sigma problem of the Crab Nebula & energy dissipation by parametric instability of large amplitude electromagnetic wave

二階 辰彦^{1*}, 天野 孝伸¹, 星野 真弘¹

Tatsuhiko Nikai^{1*}, Takanobu Amano¹, Masahiro Hoshino¹

¹ 東大・理・地惑

¹EPS, The University of Tokyo

かに星雲は古くから観測のなされてきた超新星残骸の代表例である。現在では Kennel&Coroniti(1983)らにより標準モデルが確立されており、中心星であるパルサーの斜め高速回転により電子対(電子-陽電子プラズマ、ペア・プラズマ)が生成され、これが波を伴いパルサー風として吹き出し、ある地点で衝撃波を形成して下流側に星雲領域を作るものとして理解される。しかしここで、パルサー風領域における電磁場からプラズマへの、極めて高効率のエネルギー散逸が必要であることが星雲領域からのシンクロトロン放射の観測から明らかになっているが、その機構に関する合意は得られておらず、未解決問題として残されている(問題)。

一方、宇宙プラズマ中、特に太陽風、衝撃波や磁気リコネクション領域近傍等においては、大振幅波の崩壊過程、いわゆるパラメトリック不安定がしばしば重要視される。具体的には、入射波(親波)が、周波数及び波数のマッチング条件(エネルギー・運動量保存則)を満たすような、子波を含む複数の波へと不安定成長してゆく過程である。この現象自体は実験と観測の両面からもよく調べられているものの、特にレーザー・プラズマ相互作用、またパルサーをはじめとする高エネルギー天体現象において主役を担う大振幅電磁波(相対論的強度の電磁波)を考えた場合、パラメータ依存性などに関する理解は必ずしも十分でない。

そこで今回は、前述の問題への適用を考え、ペア・プラズマ及び円偏波した大振幅電磁波からなる系についてパラメトリック不安定性の解析を行う。まず Max(1973)、Lee&Lerche(1978)らの方法に倣って線形解析を行うが、拡張として相対論的温度を考慮する。この場合、Vlasov 方程式系により記述される Landau 減衰等の運動論的效果がしばしば重要となるが、簡単のため、差し当たってはペア・プラズマに対する相対論的 2 流体方程式系を近似的に用い、自己無撞着な平衡解を用いるものとする。加えて直流磁場の存在なども考慮しながら不安定分散関係式を陽に導き、数値解を示しながらパラメータ依存性を論じる。その上で電磁粒子(PIC)コードによるシミュレーションを行い、流体近似による線形理論と比較し、不安定成長率や飽和レベルからエネルギー散逸効率について議論する。

キーワード: 相対論的プラズマ, 電子-陽電子プラズマ, パラメトリック不安定, かに星雲, パルサー, 粒子シミュレーション
Keywords: relativistic plasma, electron-positron plasma, parametric instability, crab nebula, pulsar, particle simulation

ホイッスラーモード・コーラス放射の発生過程における背景磁場強度空間勾配の影響について

Effect of the magnetic field inhomogeneity on the generation process of whistler-mode chorus emissions

加藤 雄人^{1*}, 大村 善治²

Yuto Katoh^{1*}, Yoshiharu Omura²

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ² 京都大学生存圏研究所

¹ Graduate School of Science, Tohoku University, ² RISH, Kyoto University

Whistler-mode chorus emissions with rising tones are generated through the nonlinear wave-particle interactions occurring in the region close to the magnetic equator. The mirror force plays an important role in the nonlinear interactions and the spatial inhomogeneity is a key parameter of the chorus generation process. The spatial magnetic field inhomogeneity along a field line is widely changed during a geomagnetically disturbed period. In the present study, by a series of self-consistent electron hybrid code simulations, we discuss the effect of the spatial inhomogeneity of the background magnetic field on the generation process of whistler-mode chorus emissions. We have conducted numerical experiments with different spatial inhomogeneities of the background magnetic field, while we assume that the initial velocity distribution function and the number density of energetic electrons are the same at the magnetic equator in all simulation runs. The simulation results reveal that the spectral characteristics of chorus significantly varies depending on the magnetic field inhomogeneity. In the simulation result assuming the smallest inhomogeneity, we observe the excitation of broadband whistler-mode waves whose amplitude is comparable to distinct chorus elements appeared in other simulation runs. We find that the broadband waves are a group of wave elements with rising tones nonlinearly triggered in the region close to the magnetic equator. Based on the simulation results, we show that the small spatial inhomogeneity of the background magnetic field results in the small threshold amplitude for the nonlinear wave growth and makes the triggering process of rising tone elements to emerge easily in the equatorial region of the magnetosphere.

Keywords: whistler-mode chorus, numerical experiment, wave-particle interaction

磁気圏・電離圏プラズマのアルヴェン結合に対するジャイロ運動論的アプローチ Gyrokinetic approach to Alfvénic coupling of magnetosphere and ionosphere plasmas

渡邊 智彦^{1*}, 平木 康隆¹
Tomo-Hiko Watanabe^{1*}, Yasutaka Hiraki¹

¹ 核融合科学研究所

¹National Institute for Fusion Science

The magnetosphere-ionosphere (M-I) coupling through the shear Alfvén waves plays a key role in spontaneous growth of quiet auroral arcs in polar regions. The feedback instability in the M-I coupling system, which explains simultaneous growth of ionospheric density, field-aligned current, and electric field perturbations, has often been analyzed by the MHD or two-fluid equations. For a more realistic analysis under the magnetospheric condition, however, kinetic effects of ions and electrons are necessary to be incorporated in the theoretical model.

The gyrokinetic (GK) equations for magnetized plasmas have been derived for describing the Alfvén and drift waves of which frequency is much lower than the gyro-frequency. Using a theoretical model reduced from the GK equations, we have developed a linear formulation of the feedback instability in a flux tube geometry, where the finite Larmor radius (FLR) effect of ions can be accurately incorporated. The FLR effect leads to increase of the real frequency of the feedback coupling in a large perpendicular wavenumber region. The dispersive Alfvén wave is also described by the gyrokinetic equations for electrons and the ion polarization effect. The feedback instability analysis will also be addressed in case with the kinetic electrons.

キーワード: ジャイロ運動論, 磁気圏-電離圏結合

Keywords: gyrokinetics, magnetosphere-ionosphere coupling

4次元ミンコフスキ空間での熱平衡 Killing Flows and Thermodynamics in Minkowski Space

中村 匡^{1*}

Tadas Nakamura^{1*}

¹ 福井県立大学

¹Fukui Prefectural University

宇宙プラズマの大規模現象を考えると、局所的熱平衡を仮定して、それからのずれに対応して熱流などを考察するのはひとつの有効なアプローチである。しかし、相対論的效果を考えると熱平衡状態というのは自明ではない。たとえば、相対論的回転をする物体の熱平衡状態では、中心より周辺部のほうが局所的な温度が高いことは昔から知られている。これは、エネルギーと質量が等価であるため、遠心力によってエネルギーが周辺部に「溜まる」ためである。このような状況では、局所的な温度が低いところから高いところへ向かって自発的に熱がながれるということも起こり得る。

したがって、相対論的状况での熱の物理を考えるには、大域的な熱平衡がどのような状況になっているかを知る必要がある。過去の連合大会等で4次元回転運動に対応する熱平衡等について報告してきたが、今回はこれを一般化して、平坦な4次元空間で起こり得る熱平衡状態を網羅的に論じる。

直感的にいうと、熱平衡が可能なのは流体の各要素が剛体運動している場合である。これは幾何学的には、その空間のKilling Flowに沿って各要素が運動することに対応するが、4次元のMinkowski空間では線形独立な10のKilling Flowが存在することが知られている。これらを単純な要素であらわすと、4つは並進運動に、6つは4次元回転運動に対応するものであるが、可能なKilling Flowはこの10種の線形重ね合わせで多様なパターンが存在する。Letaw and Pfautsch (1981)は、その幾何学的性質からこれらのFlowが6種類のカテゴリーに分類されることを示した。これらのうち、単純な並進運動と回転運動に対応する2種類のKilling Flowで起こり得る熱平衡が過去の連合大会等で報告したものであるが、それに加えて回転と並進の組み合わせで得られる4種類のFlowについてが今回の話題である。

これら4種類のFlowの興味深い性質のひとつにStatic Limitの存在がある。Static Limitとは、ある座標系で時間に対応する座標軸がspacelikeになり、光速を越えないかぎり、座標系に固定された一点にとどることができなくなる境界をさす。回転座標系でのLight CylinderやKerrブラックホールのエルゴ領域の境界などがその例である。本研究では、平坦な空間(Minkowski空間)のStatic Limitを横断する熱平衡について論じるが、等価原理によると、一般の空間でもローカルには近似的に平坦な空間となる座標系をとることができるはずなので、ここでの結果は一般の空間でStatic Limitがある場合の熱平衡に応用できる。たとえば、本研究の結果に基づいてKerrブラックホールのエルゴ領域に落下していく流体の熱力学について考察することもできる。

キーワード: 相対論効果, 熱力学, キリングフロー, ブラックホール

Keywords: relativity, thermodynamics, Killing flow, black holes

シヴァルツシルド BH 事象限界近傍におけるプラズマ環境における電波放射の発生 Generation of Radio Waves in the Plasma Environments of Regions close to the Event Horizon of Schwarzschild Black Hole

大家 寛^{1*}Hiroshi Oya^{1*}¹ 東北大理・地球物理¹ Geophysics, Tohoku Univ.

1. 序

前回までの研究ではデカメータ、およびデシメータ波帯において、我が銀河系中心からの電波パルスを受信していて、これが、自転するブラックホールを起源とすること、そのパルス周期は電波源となるブラックホールの自転と同期していること、またその電波源は事象限界近傍に位置し事象限界からの距離は事象限界の BH 中心から距離との比として表す時、デカメータ波源が $10E-6$ から 10^{-4} 、デシメータ電波源が $10E-2$ 以上と推測してきた。そしてシヴァルツシルド BH をとりあげ、事象限界近傍での電波源の可能性をプラズマ波動の成長の視点から検討した。モデルとして、高密度の磁化プラズマの存在とこのプラズマと相対運動をする電子ビームの存在を仮定し波動の成長の可能性を示した。今回さらに理論式の完全なものにし、また可能な BH プラズマ・パラメータ

に対し波動の分散関係を計算した。

2. 理論の骨子

一般相対論における電磁方程式は二種の表現が使われているが、本論では 4 元ゲージポテンシャルによる表現を用い、ポテンシャル場の源となる 4 元電流に対しては重力場、電磁場の影響を受けるプラズマ波動成分と Cherenkov 過程を通じて相互作用する電子ビームの存在を仮定した。粒子に対する取り扱い及び演算対象は前回述べた(2012年SGEP秋季学会)とことと同じである。即ちビームとの共鳴状態ではビームからプラズマ運動の波動成分へ運動量が平均的に輸送されるマクロモデルを用いた。輸送量パラメータは波動の角周波数 ω に対し $Z = \eta/\omega$ を用い、角周波数 ω 、屈折率 $Myu(\text{real})+i \cdot Myu(\text{imag})$ を求めている。

今回はゲージポテンシャルに関する 4 個の方程式に対しさらに加えられている条件を厳密にとりいれている。したがって、変数がひとつ増え Non-trivial Solution をもたらす条件となる 5 行 5 列の複素行列式を数値解法によって解くことになった。

3. 結果と検討

基礎事項として指摘している、シヴァルツシルド時空の湾曲を特徴づける事象限界からの比距離を代表するパラメータ $R (= 1 - r_g/r$; ただし r_g はシヴァルツシルド半径 r は BH 中心からの距離) の依存性が今回の研究でも焦点になり、光速度が cR となる点が重要であり、従ってビームの速度の上限も R に比例して減少する。効果的なビーム・波動相互作用はプラズマ周波数と高域ハイブリッド周波数の間に存在する高域ハイブリッド波ブランチとホイッスラーモード波において確認される。特に新たな 5×5 行列の解が波動の分散関係を満たすことは $R=1$ の非相対論限界で Appleton - Hartree の分散関係式と対比することによって確認された。

また以下の点でも前回の結果を確認することとなった、即ち UHR ブランチの波は十分な強度に成長しつつ下方 (BH 中心部方向) に向かうが周囲プラズマ密度の増大により局所プラズマ周波数と一致した点で外部方向に転換すると同時にモード変換をして電磁波モードになって BH から脱出する。

今回の研究では新たに、BH の Event Horizon 近傍のプラズマ・パラメータを検討し 20MHz の電波の発生には固有プラズマ周波数、および電子サイクロトロン周波数は $1E11$ から $1E14$ Hz になる。即ち、固有周波数で考えるならば赤外線からミリ波に該当する電磁波は、一般相対論効果を受けてデカメータ波帯電波となり、太陽 (同時に地球) 方向に伝搬する。途中では降着円盤領域の磁場強度、密度ともに高い領域に入るとき再びホイッスラー・モードなど、プラズマ内部伝搬モードに変換されるが、最終的に銀河系空間に脱出することが、可能と考えられる。

4. 結論

シヴァルツシルド時空において事象限界近傍にて、一般相対論的電磁気方程式を解くことにより電磁波放射の可能性を、今回特に理論式をより完全なものとして 5×5 複素行列式を解く方向に改善し検討した。結果は前回の結論を確認するもので、従来の熱的放射が R の関数として抑圧されるとの認識は誤りで、強い重力場中で加速・形成された電子ビームが周囲プラズマとの間で生む非熱的プラズマ波放射が重要である。このビーム・プラズマ相互作用によって生まれる UHR ブランチのプラズマ波動は事象限界近傍 $R=1 E-6$ までも十分発生し、このような深部の事象限界近傍でもデカメータ波電波およびデシメータ波の電波源が存在しうる。

なお、本論は回転のない BH について検討したものであるが、今後パルス電波源として不可欠な Kerr Metric による理論へと発展させてゆく計画である。

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PEM27-13

会場:301A

時間:5月24日 12:15-12:30

キーワード: ブラックホール, 一般相対論的電磁気学, プラズマ波動, 波動粒子相互作用, 事象限界近傍
Keywords: Black Hole, Shiwartzschild, General Relativistic EM Theory, Plasma Waves, Near Event Horizon

太陽探査衛星・プラズマ間相互作用に関する国際共同研究

International collaborative study on spacecraft-plasma interactions in the near-Sun environment

三宅 洋平^{1*}, 浦部 宏晃², 臼井 英之¹, ISSI Team: Spacecraft interaction with space environment³

Yohei Miyake^{1*}, Hiroaki Urabe², Hideyuki Usui¹, ISSI Team: Spacecraft interaction with space environment³

¹ 神戸大学大学院システム情報学研究科, ² 神戸大学工学部情報知能工学科, ³ International Space Science Institute

¹ Graduate School of System Informatics, Kobe University, ² Department of Computer Science and Systems Engineering, Kobe University, ³ International Space Science Institute

高度化する宇宙探査衛星ミッションや将来の人類の宇宙環境利用に向け、衛星帯電現象を含めた宇宙機周辺プラズマ環境の包括的な理解が求められている。近年ではこれに対応して、Nascap-2k、SPIS、MUSCATを初めとする数値解析ツールが多数開発・実用化されつつある。一方で、それぞれのツールが採用する数値スキームやモデリング手法の違いから、各ツールの適用範囲や精度に一長一短があることも事実であり、一つのコードのみで宇宙機周辺プラズマ環境を完全に理解することは難しい。そこで、様々なツールを駆使する研究者が共通の問題に取り組むことにより、ツール毎の機能の差を互いに補う形で宇宙機プラズマ環境の包括的な理解を目指す国際共同研究が、2011年から開始された。

本発表では、その課題の一つとして太陽探査衛星・プラズマ間相互作用に関する数値シミュレーション研究の取り組みを紹介する。太陽外部コロナ中など極太陽近傍環境では、強太陽放射に起因する大量の光電子放出や、太陽コロナプラズマの衛星表面への衝突によって引き起こされる二次電子放出により、地球磁気圏近傍とは大きく異なるプラズマ環境が衛星周辺に形成される。これにより、光電子放出時にも関わらず衛星電位が負となるなど、衛星帯電に関する通常の見解と異なる現象が生起することが知られている。本課題では現在 NASA で計画されている Solar Probe Plus を想定したシミュレーション解析を複数の数値ツールを用いて行う。特に衛星太陽照射面付近の光電子電位バリアや衛星ウェイクの構造に着目し、太陽近傍における衛星・プラズマ相互作用を定量的に理解することを目標とする。発表では、我々が開発した EMSES コードで得られた結果を中心に、研究課題の進捗を報告する。

キーワード: 科学衛星プラズマ環境, 太陽コロナプラズマ, 衛星帯電, 光電子放出, 衛星ウェイク, 粒子シミュレーション

Keywords: spacecraft-plasma interactions, solar coronal plasma, spacecraft charging, photoelectron emission, spacecraft wake, PIC simulation

イオンスケール磁気圏のバウショックと境界領域の構造 Structures of bow shock and boundary layer of ion scale magnetosphere

中村 雅夫^{1*}

Masao Nakamura^{1*}

¹ 大阪府立大学

¹Osaka Prefecture University

Interaction between the solar wind and the mini-magnetosphere of dipolar magnetized objects is investigated by a three-dimensional hybrid simulation, which treats the ions as kinetic super particles via particle-in-cell method and the electrons as a massless fluid. The hybrid simulation is suitable for the study of the mini-magnetosphere which scale is an order of the ion Larmor radius of the solar wind ions at the magnetopause boundary, because the ion kinetic effects are important for its structure. Since the dayside sheath thickness is also an order of the ion Larmor radius, the bow shock has a downstream transition region which overlap with the boundary layer of the magnetosphere. We will also discuss the effects of the interplanetary magnetic field (IMF) condition for the bow shock and boundary layer structures of the ion scale magnetosphere.

キーワード: イオンスケール磁気圏, 3次元ハイブリッドシミュレーション, バウショック

Keywords: ion scale magnetosphere, 3D hybrid simulations, bow shock

有限体積型マルチモーメント移流法とブラソフシミュレーション A finite volume formulation of the multi-moment advection scheme for Vlasov simulations

簗島 敬^{1*}, 松本 洋介², 天野 孝伸³

Takashi Minoshima^{1*}, Yosuke Matsumoto², Takanobu Amano³

¹ 海洋研究開発機構, ² 千葉大学, ³ 東京大学

¹JAMSTEC, ²Chiba University, ³University of Tokyo

The Vlasov simulation is known as one of plasma kinetic simulation methods, in which the Vlasov equation is discretized on grid points in phase space. Compared to the Particle-In-Cell (PIC) method, the Vlasov simulation is free from the statistical noise and is easy for parallel computation. On the other hand, the Vlasov simulation has the difficulty in advancing the distribution function in velocity space. Especially, the Vlasov simulation of magnetized plasma is quite difficult, owing to the gyro motion around the magnetic field line (solid body rotation in velocity space).

To overcome the difficulty, we have developed a multi-moment advection scheme (Minoshima et al. 2011; 2013). The scheme treats not only point values of a profile but also its zeroth to second order piecewise moments as dependent variables. The scheme remarkably reduces numerical diffusion and is suitable for advancing the distribution function in velocity space. We have successfully applied the scheme to electromagnetic Vlasov simulations.

Here, we newly propose a simplified form of the multi-moment advection scheme. The new scheme treats zeroth to second order piecewise moments as dependent variables at cell center, while point values of a profile are not. Then the scheme adopts a collocated grid system. The basic equation is discretized in a finite volume formulation. A numerical flux at cell face is evaluated by a one-dimensional high-order interpolation, even in multi-dimensional problems. These modifications greatly simplify the scheme compared to the previous one. Benchmark tests of a multi-dimensional advection and rotation problem show that the new scheme keeps profile well for very long time calculation (~1,000 rotations). The application of the scheme to electromagnetic Vlasov simulations will be presented.

キーワード: ブラソフシミュレーション

Keywords: Vlasov simulations

京コンピュータを用いた小天体の高解像度グローバルブラソフシミュレーション
High-resolution global Vlasov simulation of small body in the solar wind using K computer

梅田 隆行^{1*}, 伊藤 陽介¹
Takayuki Umeda^{1*}, Yosuke Ito¹

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 full electromagnetic Vlasov simulation with two configuration and three velocity spaces. The interaction of a plasma flow with a dielectric object is quite different from that with a magnetized object such as the Earth. Due to the absence of the global magnetic field, the dielectric object absorbs plasma particles which reach the surface, generating a plasma cavity called a wake on the anti-solar side of the object. In the present study, entry processes of ions into the nightside wake tail are examined. A high-resolution simulation run is now performed by using the K computer. A preliminary result will be shown.

キーワード: 計算機シミュレーション, ブラソフコード, 京コンピュータ, 小天体
Keywords: computer simulation, Vlasov code, K computer, small body