

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がりかわる現象である。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。

カレントシートの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

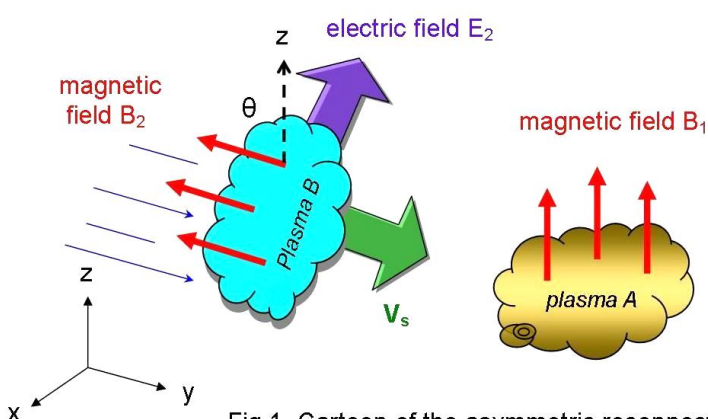


Fig.1 Cartoon of the asymmetric reconnection

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ういう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をしてきたが、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

高速磁気リコネクションにおける乱流効果 Effects of turbulence in fast magnetic reconnection

東森 一晃^{1*}, 横井 喜充², 星野 真弘¹
Katsuaki Higashimori^{1*}, Nobumitsu Yokoi², Masahiro Hoshino¹

¹ 東京大学地球惑星科学専攻, ² 東京大学生産技術研究所

¹University of Tokyo, Department of Earth and Planetary Science, ²University of Tokyo, Institute of Industrial Science

宇宙空間での磁気レイノルズ数 R_m は非常に大きく、例えば太陽風や地球磁気圏をはじめ、一般に乱流状態であることが多い。そして乱流は磁気リコネクションや衝撃波での統計加速など、様々な現象で重要な役割を果たすと考えられている。我々が注目するのは、乱流と磁気リコネクションの関係性である。

磁気リコネクションは、磁場のエネルギーを効率的にプラズマの熱・運動エネルギーに変換する特有の現象として1960年頃から注目され研究されている。磁気リコネクションに関する代表的な理論 [Sweet, 1958; Parker, 1957] から、磁気リコネクションのエネルギー変換効率は磁気レイノルズ数に依存 ($R_m^{-1/2}$ に比例) することがよく知られているが、磁気レイノルズ数が大きな宇宙空間では、観測される高効率のエネルギー変換を説明できないという大きな問題であった。近年、この問題を解決する候補の一つとして乱流が注目されている。例えば大規模な数値計算によって、高磁気レイノルズ数下で乱れが存在すると、リコネクション効率の磁気レイノルズ数依存性がなくなることがわかってきた [Loureiro+, 2009]。また乱流理論の観点から、磁気リコネクションで自発的に発達する乱流の重要性が指摘されている [Yokoi and Hoshino, 2011]。ここでは、対称性の破れによって生じるクロスヘリシティ（マクロに定義された乱流の物理量）の効果によって、リコネクション効率が劇的に上昇するという理論的予測がある。

我々は、乱流と磁気リコネクションの関係性を明らかにするために、MHD 乱流モデル [e.g., Yoshizawa, 1990] に基づいたレイノルズ平均型のMHD 乱流シミュレーションコードを開発した。開発したシミュレーションコードでは、通常のMHD 方程式系に加え、クロスヘリシティと乱流エネルギーの時間発展方程式を解く。そしてこれらマクロに定義された乱流の物理量が Ohm の法則中に現れる乱流起電力を介して、磁場や速度場などの平均場と相互に影響しあうシステムとなっている。シミュレーション結果によると、理論的予測と同様に、リコネクションアウトフローに沿ったクロスヘリシティの生成が見られた。そしてこのクロスヘリシティの空間非一様性により、リコネクション点付近に実効的な乱流拡散が局在化し、効率の良い磁気リコネクションに発展することがわかった。本講演では今回用いた乱流モデルの概要と、高効率の磁気リコネクションでの乱れの輸送と局在化の重要性について、シミュレーション結果を基に議論する。

キーワード: 磁気リコネクション, 乱流, クロスヘリシティ, 層流, リコネクション効率, シミュレーション

Keywords: magnetic reconnection, turbulence, cross-helicity, laminar flow, reconnection rate, simulation

宇宙プラズマシミュレーションにおけるハイブリッドおよびHall MHDモデルの再考

Revisiting hybrid and Hall MHD models for space plasma simulations

天野 孝伸^{1*}

Takanobu Amano^{1*}

¹ 東京大学 地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

One of the outstanding difficulties for modeling space plasma phenomena is the huge gap between many different temporal and spatial scales. Accordingly, there exist several physical models suitable to describe phenomena occurring on a specific scale. The well-known magnetohydrodynamics (MHD) description gives an adequate view for macroscopic phenomena like global magnetospheric dynamics. On the other hand, key phenomena such as reconnection at the near earth neutral line is believed to be crucial even for the global dynamics of the magnetosphere. This calls for a more sophisticated model that is able to, at least in an approximate manner, describe kinetic effects controlling the key processes, while keeping the global dynamics yet computationally tractable. It is known that when the spatial scale becomes of the order of ion inertial length, the Hall term starts to play a role. Indeed, the importance of the Hall term in reconnection physics has been recognized for years. The Hall MHD model would therefore be the simplest model beyond ideal MHD. One may also include kinetic effects by treating ions as an ensemble of macroscopic particles rather than a fluid. The hybrid model usually do so while approximating electrons as a massless charge-neutralizing fluid, thus ignoring their finite inertia and kinetic effects. Since these models do not include high frequency waves associated with electron scale physics, computational requirement is much less than the fully kinetic model in which both electron and ions are treated as kinetic particles. It appears that they are useful tools to describe physics beyond ideal MHD. In reality, however, they tend to be numerically unstable when dealing with the scale length smaller than the ion inertial length. Because of this, the applicability of the models have been severely limited to date.

Here, we look for the reason for the numerical difficulty and reconsider the formulation of these models. By analyzing the linearized magnetic field induction equation including the Hall current, we find that the problem seems to become ill-conditioned for the high frequency whistler mode branch. Namely, for whistler waves, even a small numerical error in the ion fluid velocity would be substantially amplified, implying a numerical instability. We suggest that the problem may be resolved by retaining an approximate non-zero electron inertial current term. Since the exact expression for the electron inertial current is not desirable for our purpose of describing waves with frequency much smaller than the electron cyclotron frequency, we assume that electrons are magnetized. Under this assumption, the electron inertial current may be approximated by a temporal derivative of the electric drift velocity, which makes the equation of motion of the electron fluid as essentially an equation describing time evolution for the electric field. In this model, the induction equation no longer involves explicit dependence on the ion fluid velocity. Linear analysis has been carried out to find that the present model gives an adequate description for scales larger than the electron inertial length. Comparisons with other models (MHD, Hall MHD, two fluid) as well as the applicability of the model will be addressed.

キーワード: 宇宙プラズマ, シミュレーション

Keywords: space plasma, numerical simulation

太陽ダイナモ周期活動の赤道非対称性に関するシミュレーション研究 Simulation study on the hemispheric asymmetry of the solar dynamo cycle based on the flux transport dynamo model

宿谷 大志^{1*}, 草野 完也¹
Daishi Shukuya^{1*}, Kanya Kusano¹

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

太陽の南北半球の極磁場の極性が11年周期で反転現象を起こすことは広く知られている。また、その反転時期が南北の極でずれを持っていることは Babcock (1959) によって指摘されている。さらに、Svalgaard and Kamide (2013) によれば極磁場反転の南北でのずれと黒点活動の南北半球非対称性との間には関係があるという観測的考察も進められている。しかし、黒点活動や極磁場反転の南北半球非対称性が何を原因として起きるのか、その原因とメカニズムはほとんど解明されていない。

本研究では、太陽ダイナモの赤道に対する南北半球非対称性の原因を磁場の南北半球対称成分(四重極子型成分)と反対称成分(双極子型成分)の混在による効果と考え、その影響が太陽活動の周期性の乱れとどのように関わっているかを理論的に考察する。このため、Choudhuri et al. (2004) による SURYA コードを参考に磁束輸送ダイナモモデル (Chatterjee et al. 2004) の軸対称平均場ダイナモコードを改良すると共に、これを用いた太陽ダイナモサイクルシミュレーションを2次元子午面上で行った。さらに、Nishikawa and Kusano (2008) に従い磁場を赤道に対する南北半球対称成分と反対称成分に分離することで、両成分の時間発展のパラメータ依存性や位相関係について調べた。その結果、双極子型成分が支配的な場合でも四重極子型成分が残り、二つの成分が共存することで南北半球対称性に僅かな破れが生じることを確認した。

本公演では、この対称性の破れが黒点活動と極磁場反転にどのような影響を与えるかを考察する。さらに、この対称性の破れがダイナモモデルの線形過程(運動学的ダイナモ過程)と浮上磁場に起因する非線形過程のそれぞれにどう関係しているかを議論する予定である。

キーワード: 太陽ダイナモ, シミュレーション
Keywords: solar dynamo, simulation

太陽風プラズマと月面局所磁場の相互作用に関する粒子シミュレーション Particle-In-Cell simulation on the interactions between the solar wind and a magnetic anomaly on the moon

梅澤 美佐子^{1*}, 臼井 英之¹, 松本 正晴¹, 西野 真木², 三宅 洋平¹

Misako Umezawa^{1*}, Hideyuki Usui¹, Masaharu Matsumoto¹, Masaki N Nishino², Yohei Miyake¹

¹ 神戸大学大学院システム情報学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

¹Graduate school of system informatics, ²JAXA/ISAS

本研究の目的は、月面で発見された磁気異常と太陽風の相互作用において特に磁気異常上空の太陽風応答や場の構造をプラズマ運動論的観点から明らかにすることである。研究手法としてプラズマ粒子シミュレーションを用いる。特に磁場密度が高い領域の空間解像度を上げるために適合格子細分化法を導入したプラズマ粒子シミュレーションコード PARMER を用いた。まずは、宇宙空間中に置かれた小型ダイポール磁場を想定し、それと太陽風プラズマの相互作用に関する基礎的なシミュレーションを行った。その後、月面磁気異常の具体例としてはライナーガンマに着目し、その太陽風との相互作用に関するシミュレーション解析を行った。

我々が対象としている代表的なダイポール磁場は、その中心と太陽風動圧の釣り合い点との距離が太陽風イオンの慣性長よりも小さくかつ電子ジャイロ半径よりは十分大きい、いわゆるメソスケール規模を想定している。地球規模のダイポール場と違い、メソスケール磁場の場合、磁場に対する電子とイオンのダイナミクスの違いが磁気圏形成やそれに関連するプラズマ現象に大きく影響すると予想される。すなわち、磁場を媒介した電子とイオンのスケールカップリングが重要となる。これまでのシミュレーション結果では、イオンラーマ半径より小さい磁場構造においてもメソスケールの磁気圏が形成されることがわかった。太陽風動圧と磁場の釣り合い点近傍において、イオンと電子の電荷分離が生じ、その結果生じる局所電場により、本来このスケールでは非磁化とみなされるイオン流も大きく影響を受けることを明らかにした。メソスケール磁気圏形成時における磁気圏前面でのプラズマ環境に特に着目し、電場構造や太陽風の速度分布や反射成分の有無についての解析結果を示す。

また月面磁気異常の一例としてはライナーガンマをモデルとして採用しそのプラズマ粒子シミュレーションを行った。太陽風に対してダイポール磁場がほぼ垂直に位置するため、ライナーガンマ上空ではプラズマおよび磁場密度の増加がみられるが、IMFの方向によってその違いがみられた。また磁場の影響により太陽風イオンがライナーガンマ領域の月面にほとんど達しないことも明らかになった。これらの現象について月面上空でのプラズマダイナミクスや電界構造を考慮しつつ議論する。

キーワード: プラズマ粒子シミュレーション, 磁気異常, 小型ダイポール磁場, 太陽風, ライナーガンマ

Keywords: Plasma particle simulation, magnetic anomaly, small-scale magnetic dipole, solar wind, Reiner Gamma

複数の衝撃波による粒子加速の数値実験 Numerical study on particle acceleration in multi-shock system

中野谷 賢^{1*}, 羽田 亨¹, 松清 修一¹
Masaru Nakanotani^{1*}, Tohru Hada¹, Shuichi Matsukiyo¹

¹ 九大総理工
¹ ESST, Kyushu Univ

宇宙線が生成されるメカニズムとして、無衝突衝撃波によるフェルミ加速が有力視されている。いままでに、この加速機構に関する研究は盛んに行われてきたが、そのほとんどは単一の衝撃波による加速を前提としたものである。その一方で、宇宙空間には無数の衝撃波が普遍的に存在しており、状況によっては二つの衝撃波が接近・衝突することもある。太陽圏を例にとれば、地球磁気圏衝撃波や太陽圏終端衝撃波への惑星間空間衝撃波の衝突は珍しくない。本研究では、衝撃波が2つ存在する場合の粒子加速過程を議論する。

まず、簡単なテスト粒子計算によって、衝撃波が2つ存在する場合に衝撃波統計加速がどのように働くのかを調べ、拡散輸送方程式に基づく理論的考察を行った。その結果、粒子のエネルギースペクトルは2つ(以上)のベキを持ち、ベキは高エネルギー側でよりハードになることが分かった。これは、エネルギーの高い粒子は大きな拡散係数を持つので、2つの衝撃波をまたいでより効率的な加速を受けることが可能なためである。通常、衝撃波の圧縮比により決まるベキ指数は、この場合、単一衝撃波での最大圧縮比4を超える圧縮比での値を取りうるということが分かった。

一方、上の議論とは独立に、2つの衝撃波が衝突する場合の粒子加速過程を1次元フル粒子(PIC)計算により調べた。衝撃波同士の衝突過程を議論した数値実験としては、過去にハイブリッド計算による例があり[Cargill et al., 1986]、特に超臨界垂直衝撃波同士の衝突において効率的な粒子(イオン)加速が起こることが報告されている。しかしながら、一般にハイブリッド計算では電子ダイナミクスを解かないため、粒子の初期加速過程に重要な影響を与える可能性のある、衝突前後の衝撃波のマイクロ構造までは正しく再現されない。ここでは、PIC計算によって超臨界垂直衝撃波同士の衝突を再現し、衝突前後の衝撃波の電磁場構造を詳細に調べるとともに、衝突に伴って起こるイオンおよび電子の加速過程を議論する。

キーワード: 複数衝撃波, 粒子加速, 数値実験
Keywords: multi-shock waves, particle acceleration, numerical simulation

宇宙線変成衝撃波と磁場の効果 The effect of magnetic field on cosmic ray modified shocks

齋藤 達彦^{1*}, 星野 真弘¹, 天野 孝伸¹
Tatsuhiko Saito^{1*}, Masahiro Hoshino¹, Takanobu Amano¹

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻
¹Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

銀河宇宙線は超新星残骸衝撃波において加速されていると考えられている。この加速プロセスが進行して非線形段階に到達すると宇宙線は衝撃波に対して陽に反作用を及ぼすと想定される (Drury & Voelk 1981)。最近の超新星残骸の観測において、この反作用効果が実際に置きていると示唆される結果がいくつか報告されている (Helder et al. 2009; Hughes et al. 2000; Vink et al. 2006)。これら宇宙線によって構造が大きく変化した衝撃波は特に「宇宙線変成衝撃波」と呼ばれている。

他方、銀河宇宙線の衝撃波加速においては最高エネルギー問題が大きな課題となっている。これに対して衝撃波近傍での磁場増幅により解決しようとする試みが多数提案されている。Malkov et al. (2010) はその中でも宇宙線の反作用、具体的には宇宙線の圧力勾配に起因する不安定 (Drury & Falle 1986) の効果が磁場増幅に対して支配的であると述べている。

本研究では、この不安定の磁場増幅効果並びに衝撃波との相互作用について数値計算により調べることを目的としている。同種のMHD計算がDrury & Downes (2012) で行われているが、彼らは衝撃波上流の precursor 領域のみを扱っており、衝撃波が系に含まれていない。本研究では衝撃波も含めて自己無撞着に再現し、宇宙線の反作用、衝撃波構造、磁場構造を統一的に議論する。その上で磁場増幅量と衝撃波パラメータの関係を評価する。

キーワード: 宇宙線, 衝撃波
Keywords: cosmic rays, shock

磁化プラズマ内への外部電磁場浸透の1次元PICシミュレーション：無電極電気推進の開発に向けて 1D PIC simulation of electromagnetic field penetration into magnetized plasmas for electrodeless electric thrusters

大塚 史子^{1*}, 羽田 亨¹, 篠原 俊二郎², 谷川 隆夫³
Fumiko Otsuka^{1*}, Tohru Hada¹, Shunjiro Shinohara², Takao Tanikawa³

¹ 九大・総理工, ² 東京農工大・工, ³ 東海大・総科研
¹ESST, Kyushu Univ., ²Inst. Eng, TUAT, ³RIST, Tokai Univ.

無電極電気推進では、プラズマ外部に電極群を設置することで、プラズマとの接触による電極群損耗を回避できる反面、プラズマが加速されるためには、外部電磁場がプラズマ内部に効率よく浸透する必要がある。前回の講演では、外部電磁場の完全浸透を仮定し、テスト粒子計算によりポンドロモータイプ加速/イオンサイクロトロン共鳴 (PA/ICR) を利用した無電極電気推進における推力算出を行った。しかし、外部電磁場の完全浸透は非現実的な仮定である。

本講演では、PA/ICR による無電極電気推進の開発を念頭に、外部電磁場の磁化プラズマ内への浸透過程を1次元粒子シミュレーションにより議論する。ここで、外部電磁場はイオンサイクロトロン周波数近傍の横波の電磁場を想定する。電磁場励起手法として、電極板を利用した静電的励起と電流アンテナを利用した電磁的励起のふたつを検討する。それぞれの手法に対し、外部電磁場の浸透度を定量化し、PA/ICR に適した電磁場励起手法のパラメータ探査を行う。また、浸透度の解析的導出も試みる。さらに、得られた最適な外部電磁場パラメータに対し、PA/ICR におけるエネルギー変換効率などを議論する。なお、粒子計算コードは VORPAL(Tech-X 社) を用いる。

キーワード: 外部電磁場, 電場浸透, 無電極電気推進, プラズマ加速, ポンドロモータイプ力, PIC シミュレーション
Keywords: external electromagnetic field, electric field penetration, electrodeless electric thruster, plasma acceleration, ponderomotive force, PIC simulation

RMF型加速機構におけるプラズマパラメータと磁場浸透の関係

The relationship between the parameters plasma and penetration of magnetic fields due to the RMF acceleration

山之口 和輝^{1*}, 羽田 亨¹, 篠原 俊二郎²

Kazuki Yamanokuchi^{1*}, Tohru Hada¹, Shunjiro Shinohara²

¹ 九大総理工, ² 東京農工大

¹ ESST, Kyushu Univ., ² TUAT

惑星探査などの長期ミッションにおいて高比推力の電気推進機関が有効であり注目されている。これは推進剤にプラズマを用い、これを加速することにより推進力を得る方法である。一方、イオンエンジン等、既存の電気推進機関の多くは内部に電極を有しており、この電極がプラズマと接触することで電極摩耗が生じ、寿命を制限していることが大きな問題となっている。この現状を踏まえ、我々はプラズマ生成、プラズマ加速の両段階ともに電極がプラズマに接触しない完全無電極型の新しい電気推進機関の開発研究を行っている (HEAT プロジェクト) [1]。

無電極プラズマ生成はヘリコン波を用いることにより、安定に高密度・低温度プラズマが得られることが実験的にほぼ確立している [2]。無電極プラズマ加速としてはいくつかの方法が考えられるが、本研究では回転磁場 (RMF) 型の加速機構について発表する [3]。この方法では、円柱プラズマに対して、その軸と垂直方向に回転外部磁場をかけることにより、プラズマ内部に周回方向の定常電子電流を誘起する。これは核融合分野で知られた、回転磁場による磁場逆転配位のプラズマ閉じ込め (FRC) の方法と同じものである [4]。さらに背景磁場に径方向成分があれば (発散磁場配位であれば)、励起された電子電流と背景磁場とのローレンツ力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ により軸方向の定常推進力が得られるはずである [5]。

本講演では、RMF型加速機構について、数値シミュレーションを行った結果を発表する。Particle-In-Cell 法により2次元の粒子モデルを考え、プラズマに外部回転磁場がどのように浸透するかを考察する。ローレンツ力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ によって軸方向の推進力を得るため、誘起される周方向電流が高いほど得られるスラストは大きくなり、電気推進として有効である。そのため今回は様々なプラズマのパラメータと外部回転磁場のパラメータに依存してどのように磁場浸透の空間・時間スケールおよび誘起される周方向電流が決まるかを議論する。

[1] 文部科学省科学研究費基盤研究 (S)、ヘリコン源を用いた先進的無電極プラズマロケットエンジンの研究開発、代表 篠原俊二郎、平成 21-25 年度。

[2] cf. Shinohara, S. et al., Phys. Plasmas vol. 16, 057104, 2009.

[3] Jones, I. R., Phys. Plasmas vol. 6, 1950, 1999.

[4] A.L.Hoffman, Nuclear Fusion, vol. 40, No.8, 1523, 2000.

[5] Inomoto, M., I.E.E.J. Trans. vol. 128, 319, 2008.

キーワード: 電気推進機関, 無電極プラズマ加速, 回転磁場, 数値解析

Keywords: Electric thruster, Electrodeless plasma acceleration, Rotating Magnetic Field, Numerical simulation

ヘリコン波の分散関係とその散逸過程 Dispersion relation of helicon waves with dissipation

諫山 翔伍^{1*}, 羽田 亨¹, 谷川 隆夫², 篠原 俊二郎³
Shogo Isayama^{1*}, Tohru Hada¹, Takao Tanikawa², Shunjiro Shinohara³

¹九州大学総合理工学府, ²東海大学総合科学技術研究所, ³東京農工大学大学院工学研究院

¹Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, ²Research Institute of Science and Technology Tokai University,

³Institute of Engineering, Agriculture and Technology, Tokyo University

惑星探査などの長期ミッションにおいては比推力の高い電気推進機関が有効であり注目されている。これは推進剤としてプラズマを用い、これを加速することにより推進力を得る方法である。一方、イオンエンジン等、既存の多くの電気推進機関は有電極型のため、プラズマとの接触による電極摩耗による寿命の制限が大きな問題となっている。この現状を踏まえ、我々はプラズマ生成、プラズマ加速の両段階ともに無電極である、完全無電極型の新しい電気推進機関の開発研究を行っている(HEATプロジェクト)。

無電極推進機関は、主にプラズマ生成部とプラズマ加速部からなる。特に、プラズマ生成に関しては、「ヘリコン波」というプラズマ波動をガス内に伝播させることにより効率よくプラズマを生成する技術がほぼ確立している。その一方、なぜヘリコン波がプラズマを生成するのか、という最も基本的な問題については、未解決の課題が多い。これはプラズマ生成過程が、波動の電磁場による電子加速、加速電子による中性粒子の電離、中性粒子を多く含むプラズマ中のヘリコン波伝播、さらにはプラズマ励起による分散関係の時間発展等、多くの複雑な物理過程を含み、これらが互いに影響しあう複合過程だからである。ヘリコンプラズマ生成過程を理解するための第一段階として、非一様円柱プラズマ中にヘリコン波が伝播する際にどのような電場ができ、それがどのような電子加速を引き起こすか、を理解するために、本研究では散逸がある場合のヘリコン波の分散関係を正確に求める。

ヘリコン波の分散関係は円柱プラズマ(r - z)を仮定し、励起周波数帯 ω_{ci} (イオンサイクロトロン周波数) $\ll \ll \omega_{ce}$ (電子サイクロトロン周波数)の条件下で導かれる。ヘリコン波は軸方向背景磁場 B_0 に対してある角度をもって伝播するホイッスラー波動といえる。閉じた円柱チャンバー内を想定し、軸方向波数(k_z)をある境界条件によって定めると、分散関係より、背景磁場に対して平行方向に近い角度で伝播するヘリコン波(k_H :長波長)と垂直方向に近い角度で伝播するTG波(k_{TG} :短波長)2つのモードの解が得られる。また、それぞれの解(波数)は密度勾配によって変化し、ある密度の点において2つの解は完全に一致する。Shamrai等は、ヘリコン波は非一様プラズマ中を伝播する際、ある密度点でTG波へモード変換し、このTG波が電子を効率よく加速し、プラズマ生成の主役となっている事を主張している。本研究ではまず、流体モデルにおいてプラズマ密度の非一様性、散逸がある場合の分散関係を正確に求め、衝突を介した波動の電子加速について議論する。さらに1次元PICシミュレーションによって、分散関係を議論し、また散逸過程を解析する。

キーワード: 電気推進機関, 無電極推進, ヘリコン波, TG (Trivelpiece-Gould) 波

Keywords: Electric thrusters, The electrodeless thrusters, Helicon wave, TG(Trivelpiece-Gould)wave

磁気リコネクションの AMR-PIC シミュレーションにおける開放境界条件の開発 An open boundary condition in the AMR-PIC simulations of magnetic reconnection

藤本 桂三^{1*}

Keizo Fujimoto^{1*}

¹ 国立天文台理論研究部

¹Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan

One of the main issues on magnetic reconnection processes is the mechanism breaking the frozen-in condition around the x-line and providing the electric resistivity in collisionless plasmas. It has been recognized empirically in magnetohydrodynamic simulations that the Petschek-type fast reconnection can be achieved only when an intense resistivity arises locally near the x-line. However, the generation mechanism of the resistive effects in collisionless plasmas is poorly understood in the kinetic framework. In 2D reconnection, it has been demonstrated by kinetic simulations that the momentum transport due to the Speiser-type motion of the electrons around the x-line gives rise to the so-called inertia resistivity which results in the electron viscosity term in the generalized Ohm's law. Although the electron viscosity gives sufficient dissipation for supporting the reconnection electric field under the thin current layer on the order of the electron inertia length, such a thin current sheet has been observed neither in the laboratory experiments nor in the geomagnetosphere. Recent 3D particle-in-cell (PIC) simulations with the adaptive mesh refinement (AMR) have revealed that an electromagnetic turbulence in the current density direction gives rise to significant anomalous dissipation in association with plasmoid formations and enhances the effective width of the current sheet. However, the observations in space and laboratory have shown even wider current sheet during the fast reconnection, which implies the existence of more intense turbulence. It is reasonable to expect that, in a much larger system in the current density direction, the plasmoid formations are more three dimensional, which results in more turbulent current sheet.

The previous AMR-PIC simulations of magnetic reconnection have employed the periodic boundary condition in the outflow direction and the conducting wall condition in the upstream direction. These boundary conditions have an advantage that the implementation is easy, but they require very large system size for one to investigate the quasi-steady reconnection processes. Furthermore, the particles split around the x-line accumulate eventually in the downstream region, so that the number of the super-particles in the system increases as reconnection goes on. In order to achieve more efficient simulations of quasi-steady reconnection, we have developed an open boundary condition for the AMR-PIC model both in the downstream and upstream directions. The open boundary condition allows the particles and magnetic flux to leave the system in the downstream direction and to enter the system in the upstream direction. There are two advantages of using the open boundary condition: the first is to enable us to shrink the system size drastically in the reconnection plane, and the second is that the total number of the super-particles in the system is decreased. As a result, the redundant computer resources can be used to increase the system size in the out-of-plane direction. We expect that by using the open boundary condition one can obtain one order larger system size in the current density direction.

In this paper, we show initial results of the 2D AMR-PIC simulations of magnetic reconnection under the open boundary condition. It is described that the initial current sheet plasma is removed from the system and quasi-steady reconnection is achieved. By comparing to the results of the previous AMR-PIC simulations, we will discuss the efficiency by using the new boundary condition.

Keywords: magnetic reconnection, AMR-PIC model, open boundary, turbulence

ケルビン・ヘルムホルツ不安定性の非線形発展に対するイオンジャイロ運動の効果 The effect of the ion gyro motion to the non-linear growth of the Kelvin-Helmholtz instability

上野 悟志^{1*}, 梅田 隆行¹, 中村 琢磨², 松本 洋介³, 町田 忍¹

Satoshi Ueno^{1*}, Takayuki Umeda¹, Takuma Nakamura², Yosuke Matsumoto³, Shinobu Machida¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² ロスアラモス国立研究所, ³ 千葉大学大学院理学研究科

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Los Alamos National Laboratory, ³Graduate School of Science, Chiba University

宇宙プラズマ中の不安定現象の一つであるケルビン・ヘルムホルツ不安定性 (KHI) は速度シアによって起こる流体的不安定であり、主に低緯度磁気境界層で発生することが知られている。本研究では、2次元ブラソフシミュレーションにより、KH 渦の回転方向に対するイオンのジャイロ運動の向きが異なる二通りのシミュレーションを行い、KHI の非線形発展に対するイオンジャイロ運動の影響について調べた。

KH 渦の回転方向に対してイオンのジャイロ運動が順方向である場合 (Run B)、イオンのジャイロ半径に相当する空間波長モードの成長率が、逆方向の場合 (Run A) に対して低くなることが分かった。これは、イオンジャイロ運動の安定化効果によるものである。また、KH 渦の外縁におけるイオン密度の勾配及び速度シアの半幅が、Run A の場合はイオンのジャイロ半径より薄くなり、二次的な不安定が起こる。一方 Run B の場合は、イオン密度の勾配及び速度シアの半幅がイオンジャイロ半径と同じくらいの厚さになるため、二次的な不安定性は抑制される。

キーワード: ケルビン・ヘルムホルツ不安定性, ブラソフシミュレーション, 宇宙プラズマ, イオンジャイロ運動

Keywords: Kelvin-Helmholtz instability, Vlasov simulation, space plasma, ion gyro motion

Enceladus 衛星起源水分子による電子ピッチ角散乱のテスト粒子シミュレーション Test-particle simulation of electron pitch angle scattering into the Saturn's atmosphere by neutral H₂O from Enceladus

田所 裕康^{1*}, 加藤 雄人²

Hiroyasu Tadokoro^{1*}, Yuto Katoh²

¹ 東京工科大学, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

¹Tokyo University of Technology, ²Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

Cassini observations revealed that Saturn's moon Enceladus (3.95R_s) ejects neutral H₂O from its southern pole with temporal variability [e.g., Hansen et al., 2006]. This volcanic activity, so-called 'plumes', leads to the electromagnetic coupling between Saturn's ionosphere and plasmas around Enceladus. The coupling causes auroral activities around the footprint of Enceladus [Pryor et al., 2011]. They discovered Enceladus footprint aurora with temporal variability and reported that observed field aligned fluxes of electrons and ions are sufficient to brighten the footprint aurora observed by EUV onboard Cassini. They interpreted that the variability of auroral brightness reflects variations of plume activities. In contrast, an electron precipitation into the atmosphere through pitch-angle scattering also causes auroral emissions. The dominant physical process controlling the activity of the footprint aurora is still controversial.

In the present study, for the quantitative evaluation of auroral emissions caused by the pitch-angle scattering through elastic collisions between magnetospheric electrons and H₂O particles, we have developed a spatially one dimensional test-particle simulation code with monoenergetic electron along a dipole magnetic field at Enceladus ($L = 3.95$). We assume that the initial velocity distribution of energetic electrons at the magnetic equator forms a velocity distribution with a loss-cone. It is assumed that the cross sections of elastic collisions are Born-dipole approximation [Khakoo et al., 2008]. An interaction between an electron and a background neutral cloud is solved by the Monte-Carlo method using the differential cross sections of elastic collisions for H₂O. We show a preliminary result of the variability of precipitating electrons with several hundred eV to several keV and estimation of the expected brightness of auroral emissions.

キーワード: 電子ピッチ角散乱, 電子-中性衝突, エンケラドス, テスト粒子シミュレーション, 土星

Keywords: electron pitch angle scattering, electron-neutral interactions, Enceladus, test-particle simulation, Saturn

磁気回転不安定性による磁気乱流の時間発展

Study of the time evolution of magnetic turbulence induced by the magneto-rotational instability

齋 和人^{1*}, 加藤 雄人¹, 寺田 直樹¹

Kazuhiro Sai^{1*}, Yuto Katoh¹, Naoki Terada¹

¹ 東北大学・理・地球物理

¹Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ.

磁気回転不安定性 (MRI) は降着円盤中における乱流生成機構であり、乱流中での物理過程の理解が必要とされている。MRI 乱流の時間変化は、背景磁場の鉛直成分の有無により乱流場が決定されることが指摘されている (Sai et al., 2013)。特に、このような場合、乱流応力の強度はスパイク状の時間変化を示し、この時間変動が、質量降着などに寄与する平均乱流応力の大部分を生じていることが指摘されている (e.g., Sano & Inutsuka, 2001)。そのため、円盤内乱流における乱流の強さの決定要因の解明の上で、乱流の時間発展の理解が必要とされている。しかしながら、この時間発展について、これまで本格的な解析は行われてこなかった。

私たちのグループでは、MRI 乱流中における物理過程を明らかにすることを目的に、3次元の磁気流体力学 (MHD) の数値シミュレーション研究を行った。それにより、MRI の非線形段階における物理過程の大部分を解明することができた。特に、非線形段階において最大振幅となる特徴的なモードが存在することが確認された。本講演では、この最大振幅モードの特徴、及び、乱流の飽和と緩和過程について報告する。

解析の結果、確認された最大振幅のモードは、Sano & Inutsuka (2001) らによって確認された、チャンネル流を形成したものと同一のものであると考えられる。これまで、非線形段階におけるチャンネル流の形成は、乱流中で増幅した磁場と MRI の最大成長モードとの関係によるものと考えられていた (Sano & Inutsuka, 2001)。しかし、私たちのグループにおける詳細な解析により、非線形段階における最大振幅モードは、MRI 分散関係によって説明可能であるが、その波形は、円盤の厚さと背景磁場の鉛直成分によって決定されており、これまで指摘されていたような、乱流中で増幅した磁場の影響によるものではないことが明らかとなった。また、乱流の飽和と緩和の過程においては、パラサイト不安定性 (Goodman & Xu, 1994) が励起していることを示唆する結果が得られた。さらに、MHD 方程式中の各項を評価することで、非線形段階における乱流の緩和が生じるための条件式を導くことができた。この式から、乱流中の磁場の鉛直成分の増幅が緩和に強く影響していることが示唆された。この磁場の鉛直成分の増幅はパラサイト不安定性によるものと示唆される。加えて、この緩和条件式を用いることにより、乱流応力最大振幅モードが決定される理由についても矛盾なく説明することが可能となった。

最大振幅モードの理解により、これまで確認はされていたがその理由が不明のままとされていた、磁場の方位角方向成分と動径方向成分の持つエネルギー比に関して、矛盾なく説明することが可能となった。これらの成果は、円盤の大局的磁場構造に関する情報が得られれば、局所的な乱流場において支配的な乱流場の構造を推測できることを意味している。乱流の性質に関する背景磁場依存性は、円盤内でのダストの合体成長の議論や、円盤内乱流における MRI の影響を評価する上でも強力なツールになるものと期待される。

キーワード: 降着円盤, 磁気流体力学, 乱流, 磁気回転不安定性

Keywords: accretion disk, magnetohydrodynamics, turbulence, magneto-rotational instability

多成分プラズマにおける斜め伝播 EMIC 波の線形分散解析 Linear dispersion analyses on EMIC waves in oblique propagation in multi-component plasmas

杉山 肇^{1*}, 大村 善治¹
Hajime Sugiyama^{1*}, Yoshiharu Omura¹

¹ 京都大学生存圏研究所

¹ Reserach Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

地球磁気圏内の放射線帯に存在する高エネルギー粒子は人工衛星に悪影響を与えることが知られている。例えば相対論的電子は衛星の深部に侵入し帯電破壊を引き起こす。この高エネルギー粒子は磁気嵐が生じると一旦減少することが知られている。磁気嵐と共に観測されている L モード電磁イオンサイクロトロン波 (EMIC 波) によって、相対論的電子がピッチ角散乱を受け、極域に降下していることが原因ではないかと近年指摘されている。そこで本研究では多成分プラズマにおける EMIC 波の線形分散解析を行う。特に斜め伝播時の成長率や偏波特性に関して詳細に調べる

解析に際して、京都大学生存圏研究所で長年開発されてきたプラズマ分散関係解析プログラム KUPDAP (Kyoto University Plasma Dispersion Analysis Package) の改良を行った。本発表では KUPDAP の基本的な機能と及び偏波特性を表示するなどの追加された機能を説明し、デモンストレーションを行う。

キーワード: 多成分プラズマ, 電磁イオンサイクロトロン波, 斜め伝播, 線形分散解析

Keywords: multi-component plasma, EMIC, oblique propagation, linear dispersion analysis