

ミラー磁場中のアルベン波動の自発励起とイオンとの相互作用 Spontaneous excitation of Alfvén waves and their interactions with high-energy ions in a magnetic mirror configuration

市村 真^{1*}; 池添 竜也¹
ICHIMURA, Makoto^{1*}; IKEZOE, Ryuya¹

¹ 筑波大学プラズマ研究センター

¹ Plasma Research Center, Univ. of Tsukuba

In laboratory fusion plasmas, high-energy ions are produced with DD and DT fusion reactions and are also created with high-energy neutral beam injection and electromagnetic waves for plasma heating. Special emphasis is given to plasma waves excited by such high-energy ions and their interactions with particles. For example, energetic alpha particles produced with DT fusion process can interact resonantly with shear Alfvén waves during slowing-down process, and excite plasma instabilities, that is, so-called Alfvén eigenmodes (AEs). Recently, enhancement of energetic ion transport caused by these instabilities has been remarked on its deleterious effects. When a small fraction of alpha particles is transported to the first wall in burning plasma devices, plasma facing materials can be damaged seriously. Many kinds of the experimental observations related to such wave-particle interactions are reported. In this report, spontaneously excited waves in Ion Cyclotron Range of Frequency (ICRF) and their interactions with high-energy ions in a mirror magnetic field configuration are presented.

The ICRF waves are frequently used for the plasma heating in laboratory fusion devices with the mirror magnetic field configuration. When the ICRF power and consequent wave energy levels are increased, it will become important to understand the detailed physics of wave-wave and wave-particle interactions. It is required to consider both linear and nonlinear processes for deposition of ICRF powers. In the ICRF heating experiments on the GAMMA 10 tandem mirror, the maximum ion temperature in the perpendicular direction has reached 10 keV and the temperature anisotropy (which is defined as the temperature ratio of perpendicular to parallel to the magnetic field line) becomes more than 10 in the central cell. Alfvén-ion-cyclotron (AIC) waves are spontaneously excited owing to such the strong temperature anisotropy. The excitation of the AIC wave is one of the common physical phenomena in space plasmas with an anisotropic velocity distribution. High energy ions, of which energy is more than 50 keV, have been observed along the magnetic field line at the open end of the mirror magnetic field configuration. The transport of high-energy ions along the magnetic field line owing to the loss processes other than the classical Coulomb scattering has been suggested. The existence of considerable energy transport along the magnetic field line owing to the AIC waves is discussed theoretically. The AIC waves in GAMMA 10, which has several discrete peaks in the frequency spectrum, are excited as eigenmodes. Their spatial structures are measured with a microwave reflectometer inside the plasma and magnetic probes in the peripheral region. Low-frequency fluctuations around 0.1 MHz, which is a differential frequency between discrete peaks of the AIC waves, are observed in the central cell. These fluctuations are also observed in the high-energy ion signal detected by a semiconductor detector installed at the end for measuring ions along the magnetic field line. Pitch angle scattering in the velocity space owing to the spontaneously excited Alfvén waves are indicated. The radial transport of high-energy ions owing to the low-frequency MHD instability has been observed, however, the transport across the magnetic field line owing to the AIC waves has not yet been detected.

Observations of spontaneously excited waves in ICRF in the large tokamak experiments are also reported as Ion Cyclotron Emissions (ICE). The fluctuations in ICRF are driven by the presence of non-thermal ion distribution in magnetically confined plasmas and plasmas with the strong anisotropy. Waves owing to fusion products of ³He and T ions are clearly detected in D-plasma and alpha particles in DT-plasma experiments.

キーワード: ミラー磁場, アルベン波動, 波動-粒子相互作用, アルベンイオンサイクロトロン波動

Keywords: magnetic mirror configuration, Alfvén wave, wave-particle interaction, Alfvén Ion Cyclotron wave

電磁イオンサイクロトロン波動による非線形波動粒子相互作用 Nonlinear wave particle interaction of electromagnetic ion cyclotron wave

小路 真史^{1*}; 大村 善治²

SHOJI, Masafumi^{1*}; OMURA, Yoshiharu²

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 京都大学生存圏研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Spacecraft observations and simulations show generation of coherent electromagnetic ion cyclotron (EMIC) triggered emissions with rising-tone frequencies. In the inner magnetosphere, the spontaneously triggered EMIC waves are generated by the energetic protons with large temperature anisotropy. We reproduced EMIC triggered emissions in the Earth's magnetosphere by real scale hybrid simulations with cylindrical magnetic geometry. We perform parametric analyses of electromagnetic ion cyclotron (EMIC) triggered emissions on the gradient of the non-uniform ambient magnetic field using a hybrid simulation. According to nonlinear wave growth theory, as the gradient of the ambient magnetic field becomes larger, the theoretical threshold of the wave amplitude becomes larger although the optimum wave amplitude for nonlinear wave growth does not change. With a larger magnetic field gradient, we obtain coherent rising tone spectra because the triggering process of the EMIC triggered emission takes place only under the limited condition of the wave amplitude. On the other hand, with a smaller magnetic field gradient, triggering of the emissions can be caused with various wave amplitudes, and then the sub-packets are generated at various locations at the same time. The concurrent triggerings of emissions result in incoherent waves, observed as "broadband" EMIC bursts. Broadband emissions induce rapid precipitation of the energetic protons into the loss cone since the scattering by the concurrent triggering takes place faster than that of the coherent emissions. The coherent triggered emission causes efficient proton acceleration around the equator because of the stable particle trapping by the coherent rising tone emission.

Keywords: triggered emission, electromagnetic ion cyclotron wave, wave particle interaction, acceleration, scattering

太陽高エネルギー粒子のスペクトル：加速域と観測域で違いはあるのか？ Solar energetic particle spectrum at the Sun and the Earth

久保 勇樹^{1*}
KUBO, Yuki^{1*}

¹ 情報通信研究機構

¹National Institute of Information and Communications Technology

比較的高エネルギーの高い太陽高エネルギー粒子は、太陽フレアやコロナ中の衝撃波で加速されていることが良く知られており、特にコロナ中の衝撃波での加速機構は1次のフェルミ加速であると考えられている。フェルミ加速の理論では加速された粒子は冪分布となり、その冪指数は衝撃波の圧縮率で決まっている。太陽高エネルギー粒子のスペクトルは観測的にも良く調べられており、観測されるスペクトルはほぼ冪分布（+高エネルギー側での指数関数的な減少）で良く再現される。これは一見当然の結果であるように見えるが、観測されるスペクトルは、観測場所でのスペクトルであり加速領域のスペクトルではなく、これらのスペクトルが同じであるかどうかは自明ではない。多くの観測から、Ground Level Enhancement(GLE)のスペクトルの冪指数は典型的にはおおよそ6であると言われているが、もしこれが加速域でのスペクトルであるとするならば、フェルミ加速の理論から衝撃波の圧縮率はおおよそ1.6となり比較的弱い衝撃波であり、陽子を短時間でGeVエネルギーにまで加速するのは難しいかもしれない。また、フェルミ加速の理論から予想されるスペクトルは定常状態のスペクトルであるが、多くの研究から衝撃波で加速される粒子のスペクトルは時間発展をすることが分かっている。これもまた、加速域と観測域での異なったスペクトルを示唆する。本研究では、太陽高エネルギー粒子のスペクトルに加速域と観測域で違いがあるのかについて、太陽から地球までの太陽高エネルギー粒子の輸送過程をシミュレーションすることで調べる。

キーワード: 太陽高エネルギー粒子, スペクトル
Keywords: Solar energetic particles, Spectra

GEMSIS-RC モデル:ドリフト運動論近似に基づく地球内部磁気圏における高エネルギー粒子と ULF 波動の相互作用の研究 Coupling between ULF waves and high-energy particles in the inner geomagnetosphere based on a drift-kinetic simulation

関 華奈子^{1*}; 天野 孝伸²; 齊藤 慎司³; 三好 由純¹; 桂華 邦裕¹; 宮下 幸長¹; 松本 洋介⁴; 梅田 隆行¹; 海老原 祐輔⁵
SEKI, Kanako^{1*}; AMANO, Takanobu²; SAITO, Shinji³; MIYOSHI, Yoshizumi¹; KEIKA, Kunihiro¹; MIYASHITA, Yukinaga¹; MATSUMOTO, Yosuke⁴; UMEDA, Takayuki¹; EBIHARA, Yusuke⁵

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 東京大学大学院理学系研究科, ³ 名古屋大学大学院理学研究科, ⁴ 千葉大学大学院理学研究科, ⁵ 京都大学生存圏研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Graduate School of Science, University of Tokyo, ³Graduate School of Science, Nagoya University, ⁴Graduate School of Science, Chiba University, ⁵Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Understanding of acceleration mechanisms of electrons to cause drastic variation of the Earth's outer radiation belt is one of outstanding issues of the geospace researches. While the radial diffusion of the electrons driven by ULF waves has been considered as one of the candidate mechanisms, efficiency of the mechanism under realistic ULF characteristics and distribution is far from understood. GEMSIS (Geospace Environment Modeling System for Integrated Studies) of STEL, Nagoya University, is the observation-based modeling project for understanding energy and mass transportation from the Sun to the Earth in the geospace environment. The GEMSIS-Magnetosphere working team has developed a new physics-based model for the global dynamics of the ring current (GEMSIS-RC model). The GEMSIS-RC model is a self-consistent and kinetic numerical simulation code solving the five-dimensional collisionless drift-kinetic equation for the ring-current ions in the inner-magnetosphere coupled with Maxwell equations. In contrast to previous ring current models assuming a force-balanced equilibrium, the new model allows the force-imbalance to exist, which generates induced electric field through the polarization current. The most prominent advantage of the new model is the capability of describing fast time scale phenomena such as injections during substorms and MHD-time scale (ULF) waves.

We applied the GEMSIS-RC model for simulation of global distribution of ULF waves. Comparison between runs with/without ring current ions show that the existence of hot ring current ions can deform and amplify the original sinusoidal waveforms. The deformation causes the energy cascade to higher frequency range (Pc4 and Pc3 ranges). The cascade is more pronounced in the high beta case. It is also shown that the existence of plasmopause strengthens ULFs outside the plasmopause and widens the MLT region where the E_r (toroidal) component is excited from initially-given E_{ϕ} (poloidal) component. We also report the basic characteristics of the ring current driven ULF waves and its effects on the electron transport in the inner magnetosphere.

キーワード: ドリフト運動論近似, リングカレント, 放射線帯, MHD 波動, 内部磁気圏, ドリフト共鳴

Keywords: drift-kinetic approximation, ring current, radiation belt, MHD wave, inner magnetosphere, drift resonance

ラングミュア乱流中を運動する相対論的電子からの放射スペクトル Radiation spectra from relativistic electrons moving in a Langmuir turbulence

寺木 悠人^{1*}
TERAKI, Yuto^{1*}

¹ 大阪大学→理化学研究所
¹ Osaka University / RIKEN

3次元等方ラングミュア乱流中を運動する相対論的電子からの放射スペクトルを第一原理的な数値的手法を用いて調べた。高エネルギー天体の相対論的な衝撃波領域では2流体不安定によりラングミュア乱流が励起されうるが、その領域で加速された電子の放射スペクトルに与える影響については完全には分かっていない。ラングミュア乱流のパラメータとしては強度 E 、時間変動のスケール ω 、空間的なスケール λ がある。それらを用いて表される強度パラメータと振動パラメータがその中運動する電子からの放射スペクトルを特徴づける。強度パラメータ a は $eE\lambda/mc^2$ 、振動パラメータ b は $\lambda\omega/c$ と表される。ここで e は素電化、 m は電子質量、 c は光速である。放射スペクトルの特徴を様々な a と b について調べた。計算手法は以下の通りである。フーリエモードの重ね合わせで乱流を生成し、電子を注入する。運動方程式を解くことで得た情報からリエナール=ヴィーヘルトポテンシャルを用いて放射スペクトルを計算する。結果として a - b 平面上にどのようにスペクトルの特徴が分布するか明らかにした。その中で先行研究では曖昧だった $a > b > 1$ の領域のスペクトル形状はシンクロトロンと良く似たものであることを明らかにした。その解析的解釈から、スペクトルを特徴付ける機構はウィグラーと類似していることを見だし、この $a > b > 1$ の放射機構を「Wiggler Radiation in Langmuir turbulence」と名付けた。また、天体の衝撃波領域では $a \approx b \approx 1$ が期待される。ピーク振動数よりも低振動数領域のスペクトル指数はその領域で様々な値をとる。この結果と天体の観測結果との比較についても議論する。

キーワード: 放射機構, 相対論的粒子, 乱流電磁場

Keywords: Radiation mechanism, Relativistic particle, Turbulent electromagnetic field

AMATERAS で観測された太陽電波バーストのスペクトル微細構造とその生成機構 Fine Spectral Structures and Their Generation Mechanisms for Solar Radio Bursts Observed by AMATERAS

岩井 一正^{1*}; 三好 由純²; 増田 智²; 土屋 史紀³; 森岡 昭³; 三澤 浩昭³

IWAI, Kazumasa^{1*}; MIYOSHI, Yoshizumi²; MASUDA, Satoshi²; TSUCHIYA, Fuminori³; MORIOKA, Akira³; MISAWA, Hiroaki³

¹ 国立天文台 野辺山太陽電波観測所, ² 名古屋大学 太陽地球環境研究所, ³ 東北大学 惑星プラズマ・大気研究センター
¹Nobeyama Solar Radio Observatory, NAOJ, ²STEL, Nagoya University, ³PPARC, Tohoku University

コロナ中の粒子加速現象によって非熱的に加速された電子の一部は、メートル波帯域において電波放射を起こす。メートル波太陽電波バーストには1秒未満の継続時間を持つスペクトル微細構造が多く存在することが知られている。これらは非熱的粒子が生成され電波を放射するまでの様々なプラズマ素過程において、プロセスの不均一性によって変調を受けた影響と考えられ、太陽コロナを舞台に粒子加速や波動粒子相互作用といったプラズマ素過程を議論するうえで重要な観測対象である。

本研究では、太陽電波望遠鏡 AMATERAS の超高分解分光観測により、メートル波太陽電波バーストの一種である I 型バーストのスペクトル微細構造の観測に成功した。更にバーストのスペクトル構造を分解するための解析アルゴリズムを開発し、個々のバーストの最大強度、継続時間、放射帯域幅の全てを分解することに成功した。その結果、バーストの最大強度はべき乗分布し、そのべきは 2.9-3.3 と、通常のフレア比ベソフな傾きを有していた。一方で、継続時間、放射帯域幅は指数関数的に分布していた。バーストの最大強度、継続時間、放射帯域幅間の相関関係を調べた結果、これら 3 つのパラメータは互いにほぼ無相関であることが分かった。一方、個々のバーストの強度の時間変化率を成長率と定義し、成長率と最大強度の相関を調べた結果、強い相関関係があることを発見した。以上の結果は、放射の種となる非熱的粒子が生成された後、静電波の励起過程、電波の放射過程、伝搬過程で変調を受けた結果が I 型バーストのスペクトルに反映されていると考えることで説明できる。連続して放射されるバーストの成長率は時間変化し、その変化の時定数はコロナ環境の変化の時定数に対して著しく大きかった。よって電波の放射源にはプラズマ環境の連続的な変化があり、そこからさまざまな成長率のバーストが同時多発的に放射され、それらが重なり合って観測されたと考えられる。

キーワード: 太陽, 太陽電波, コロナ, 波動粒子相互作用, 電波放射過程

Keywords: Sun, Solar radio burst, corona, wave-particle interaction, radio emission processes

平行衝撃波での上流波と粒子加速の共進現象 Co-evolution of upstream waves and accelerated particles around parallel shocks

杉山 徹^{1*}; 藤本 正樹²
SUGIYAMA, Tooru^{1*}; FUJIMOTO, Masaki²

¹ 海洋研究開発機構, ² 宇宙航空研究開発機構
¹JAMSTEC, ²JAXA

We have investigated the co-evolution of upstream waves and the accelerated particles around the parallel shock. Hybrid particle simulations are performed in the exactly parallel shock configuration with Mach number of ~ 10 . The upstream waves convecting into the shock surface contribute the particles acceleration as reported in Sugiyama et al. (2001). The appropriate wave-length exists for the particle energization, that is, the longer wave-length wave leads the higher energy particles. Simultaneously, the higher energized particles excite the longer wave-length waves in the upstream region. Here we report that the higher energy particles and longer wave-length waves are observed as the time elapses later in the simulation runs. Therefore, the present process is "co-evolution" of the upstream waves and accelerated particles.

キーワード: 無衝突衝撃波, 粒子加速, 波動粒子相互作用
Keywords: collisionless shock, particle acceleration, wave-particle interaction

近接・衝突する二つの斜め衝撃波：衝撃波構造、粒子加速 Colliding Two Oblique Shocks: Shock Structures and Particle Acceleration

中野谷 賢^{1*}; 松清 修一¹; 羽田 亨¹
NAKANOTANI, Masaru^{1*}; MATSUKIYO, Shuichi¹; HADA, Tohru¹

¹ 九大総理工

¹ ESST, Kyushu univ.

プラズマ中に発生する無衝突衝撃波（以下、衝撃波）は高エネルギー粒子を効率よく生成すると考えられている。その加速機構を明らかにするために多くの研究がなされてきたが、従来の議論はどれも単一の衝撃波を仮定しており、複数の衝撃波による加速はほとんど考えられてこなかった。実際、宇宙には衝撃波が普遍的に存在しており、衝撃波同士が接近・衝突することは頻繁に起こる。例えば、コロナ質量放出により生じた衝撃波が地球の磁気圏衝撃波に衝突したり [H. Hietala et al., 2011]、惑星間空間衝撃波が太陽圏終端衝撃波を横切ることが観測されている [J. Y. Lu et al., 1999]。これらの現象において、衝撃波構造の変化や粒子の加速・加熱などの物理過程は未解明である。

衝撃波同士の衝突過程を議論したプラズマ運動論の数値実験としては、過去にハイブリッド計算による例があり [Cargill et al., 1986]、超臨界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。

そこで、本研究では、1次元 Full-Particle-in-Cell シミュレーションを用いて二つの衝撃波の近接・衝突過程を模擬する。特に、斜め衝撃波同士の衝突において次の3点の結果に注目する。

1. シミュレーションでは、接近しつつある2つの斜め衝撃波上流域で高エネルギー電子が加速された。これらは、二つの衝撃波による反射を繰り返して効率的に加速（フェルミ加速）されており、被加速粒子の一部は、衝撃波衝突時に増幅される磁場や衝突後の衝撃波によってさらに加速されることが分かった。
2. 衝突前において、上流に染み出した電子によって大振幅波動が励起されることが分かった。この波動の励起機構、粒子の伝播や衝撃波構造への影響を議論する。
3. 衝撃波衝突後の下流域でのプラズマの密度や圧力が磁気流体力学 (MHD) により求められる値よりも低いことが分かった。その原因としては高エネルギーの電子が上流に流出したためであると考えられる。また、磁気流体力学で求められる衝突後の衝撃波の物理量（磁場の大きさ、衝撃波の速度 etc.）と PIC シミュレーションの結果との比較を行い、運動論的效果の影響を議論する。

キーワード: 無衝突衝撃波, 複数衝撃波, 粒子加速, 数値実験

Keywords: collisionless shock, multi-shock waves, particle acceleration, numerical simulation

高マッハ数の準平行衝撃波における粒子加速 Particle acceleration in high Mach number quasi-parallel shocks

加藤 恒彦^{1*}
KATO, Tsunehiko^{1*}

¹ 広島大学
¹Hiroshima University

We study particle acceleration process of electrons and protons in high Mach number ($M_A \sim 30$) quasi-parallel collisionless shocks by particle-in-cell (PIC) simulation. We found that a fraction of protons which consist of the plasma are injected into acceleration mechanisms and efficiently accelerated around the shock. The energy spectrum of the accelerated protons becomes power-law like distribution. A part of electrons are also accelerated around the shock although they are roughly two orders of magnitude fewer than the accelerated protons. For both protons and electrons, the acceleration processes are often not diffusive and their time-scales are even shorter than the respective gyration times. We also found that protons reflected at the shock generate circularly polarized Alfvén waves with very large amplitude in the upstream region of the shock and that, because of the strong perpendicular magnetic field of these waves, the structure of the collisionless shock itself is in fact similar to that of quasi-perpendicular shocks.

キーワード: 粒子加速, プラズマ, 無衝突衝撃波
Keywords: particle acceleration, plasma, collisionless shocks

準垂直衝撃波における電子加速の粒子シミュレーション Particle simulations on electron acceleration at Quasi-Perpendicular Shocks

篠原 育^{1*}; 藤本 正樹¹; 中村 琢磨²
SHINOHARA, Iku^{1*}; FUJIMOTO, Masaki¹; NAKAMURA, Takuma²

¹ 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所, ² ロスアラモス国立研究所

¹Institute of Space and Astronautical Science / Japan Aerospace Exploration Agency, ²Los Alamos National Laboratory

We found efficient production of non-thermal electrons up to $\gamma \sim 20$ in results of three-dimensional full kinetic simulations of quasi-perpendicular shocks. The seed acceleration occurs in large-amplitude electromagnetic wave excited in the most front region of the shock foot. A small portion of electrons keeps staying in the foot region due to the scattering by the large-amplitude electromagnetic wave, and these electrons can get energy from the motional electric field in the shock rest frame. Since the large-amplitude electromagnetic wave is only possible in 3-D simulations, no electron acceleration is observed in previous 1-D and 2-D simulations. After the seed acceleration, these electrons can be further accelerated at the shock ramp region by the shock drift acceleration. The acceleration process occurs during the steepen phase of the self-reformation, and the acceleration efficiency depends on the phase of the shock self-reformation. In contrast to the standard Fermi acceleration at quasi-parallel shocks, the electron acceleration process at quasi-perpendicular shocks is much quicker (order of the ion cyclotron period); however, electrons cannot experience effective acceleration again and again so that there would be an energy limitation of the acceleration. In this presentation, we will discuss the energy limit of electron acceleration at quasi-perpendicular shocks by using simulation results obtained from the K computer.

キーワード: 衝撃波加速, 粒子シミュレーション
Keywords: shock acceleration, particle simulation

平行衝撃波における MHD 波に散乱される速い粒子加速 The fast acceleration of particles scattered by MHD wave in parallel shock

村木 昂大^{1*}; 天野 孝伸²; 星野 真弘²
MURAKI, Koudai^{1*}; AMANO, Takanobu²; HOSHINO, Masahiro²

¹ 東大・地惑, ² 東京大学

¹EPS. Univ. of Tokyo, ²University of Tokyo

銀河宇宙線の起源は銀河系内の超新星残骸衝撃波であると考えられており、その生成に関する標準理論として一次フェルミ加速が広く受け入れられている。しかし一次フェルミ加速は、knee までの高エネルギー宇宙線を説明するには、必ずしも十分な効率でない。超新星残骸の寿命という限られた時間の中で十分に宇宙線粒子を加速することは難しく観測を説明できない。この問題の解決の為に付加的な加速もしくはより効率的な加速機構が求められる。

衝撃波加速の理解には散乱過程が重要な意味を持ち、過去の研究ではモンテカルロ法のような数値的散乱モデルや磁場擾乱による散乱が数値シミュレーションによって取り扱われて来た。そうした取り組みの中でも観測と整合する衝撃波近傍に立つ磁気流体波動 (MHD 波) に補足された粒子の加速が注目されている。一様系での議論においては、MHD 乱流中に局在化した波束 (Kuramitsu & Hada, 2000) によって荷電粒子が効率的に大角度散乱されることが示された。平行衝撃波近傍での単一波長の大振幅 MHD 波を利用した散乱過程 (Sugiyama et al., 2001) は、ドリフト加速に伴う速い「粒子注入過程」とそれに続く速いフェルミ加速の可能性を示唆する。本研究では、これまでの研究を発展させ、平行衝撃波に立つ MHD 乱流を散乱体と考えた速い衝撃波加速の可能性を調べる。テスト粒子解析を行うことで、準線形領域からコヒーレンスを持った乱れ場や大振幅波動を考えた衝撃波加速についても議論する。

キーワード: 粒子加速, 宇宙線, 衝撃波, アルフベン波, コヒーレンス, 大振幅

Keywords: acceleration of particles, cosmic ray, shock, Alfvén wave, coherence, large amplitude

PEM29-12

会場:503

時間:4月30日 12:15-12:30

非一様流の中でのプラズマ統計について On statistics of a plasma in a nonuniform flow

羽田 亨^{1*}
HADA, Tohru^{1*}

¹九州大学大学院総合理工学研究院
¹IGSES, Kyushu University

衝撃波統計加速（フェルミ加速）により良く知られているように、圧縮場の中での散乱体により、高エネルギー粒子は効率よく加速される。一方、膨張場では減速されるが、圧縮場による加速の逆過程ではない。太陽風など多くのプラズマ流は一様流ではなく、（3次元的に）圧縮と膨張を繰り返す部分からなる非一様流である。このような媒質の中でのプラズマ分布の統計を理論および数値計算により議論する。現実に観測される熱的非平衡分布との関連について触れる。

キーワード: フェルミ加速, 非平衡分布
Keywords: Fermi acceleration, Nonequilibrium distribution

ヘリコン波動の伝搬とモード変換、プラズマ加熱過程のシミュレーション Helicon wave propagation, mode conversion, and plasma heating

諫山 翔伍^{1*}; 羽田 亨¹; 谷川 隆夫²; 篠原 俊二郎³

ISAYAMA, Shogo^{1*}; HADA, Tohru¹; TANIKAWA, Takao²; SHINOHARA, Shunjiro³

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,

³Tokyo University of Agriculture and Technology, Institute of Engineering

ヘリコンプラズマは、アルゴンなどの中性ガス中に電磁波であるヘリコン波（有限境界がある場合のホイスラー波）を励起して生成するプラズマである。室内で高効率に低温、高密度のプラズマを生成できるため、プラズマプロセスや電機推進機関など、広い範囲での応用が期待されている。一方で、波動現象とプラズマ生成機構について更なる物理的理解が求められている。ヘリコンプラズマ生成の主なメカニズムとしては、ヘリコン波動の分散関係、衝突・無衝突によるプラズマの加熱、中性粒子の電離・再結合を考慮した分散関係の時間発展が挙げられる。

本発表ではヘリコンプラズマ生成を理解する上での初期段階として、ヘリコン波動の伝搬とモード変換、プラズマ加熱過程について議論する。Shamrai (1996) によれば、ヘリコン波は静電的な波である Trivelpiece-Gould (TG) 波へ線形モード変換し、モード変換によって生じた TG 波が強減衰し、高効率に電子を加熱する。しかし実際は、モード変換効率、TG 波の励起は散逸の大きさに強く依存する。ここでは、流体シミュレーション、PIC シミュレーションを用いて、モード変換効率、波動減衰、波動-粒子相互作用によるプラズマ加熱について議論する。また、ヘリコン波の直接的な減衰が、実際の実験における状況下でのプラズマ加熱で主要な役割を果たしていることを示す。

キーワード: ヘリコンプラズマ, ヘリコン波, TG (Trivelpiece-Gould) 波, モード変換, PIC シミュレーション

Keywords: Helicon plasma, Helicon wave, TG(Trivelpiece-Gould) wave, Mode conversion, PIC simulation

外微分形式による解析力学：ハミルトン・ヤコビ方程式と流体力学 Hamilton-Jacobi equation based on exterior derivative

中村 匡^{1*}
NAKAMURA, Tadas^{1*}

¹ 福井県立大学
¹ Fukui Prefectural University

電磁場や流体などの空間に連続的にひろがる場の解析力学は、普通、時間をパラメーターとし、場を無限自由度の力学変数とみなして構築される。これは有限個の自由度をもつ系の時間発展を追う解析力学の自然な拡張であるが、電磁場などの場合、ある特定の系での時間座標をパラメーターとして使うため、相対論的なあつかいでは明示的なローレンツ普遍性が失われるという欠点がある。また、このアプローチでは、電磁気などとゲージ場の場合にゲージ自由度に対応して変数の自由度が増えるため、なんらかの拘束条件を追加しなければ発展方程式の数が足りなくなってしまうという問題もある。このため、電磁場の正準理論はクーロンゲージなどのローレンツ普遍性を犠牲にしたゲージ固定をするか、あるいはディラック括弧のような複雑な数学テクニックを使うかなどしてこの問題を避けている。

前回の学会で、Cartan によって案出された外微分形式の手法を使って、時間と空間を対等のパラメーターとして扱い、明示的にローレンツ不変な解析力学を構築する方法について報告した。この手法により、ゲージ固定などをしなくても明快にゲージ場の解析力学を構築できるという利点もある。今回はそのハミルトン・ヤコビ方程式への応用と、流体力学への適用可能性について報告する。

ハミルトン・ヤコビ方程式は解析力学の教科書の最後に出てくる、あまり実用性のないわけのわからない数学手法というイメージがあるが（そしてそれは多くの場合正しいが）、古典力学から量子力学への

橋渡しとして重要な意味をもつ。また、理論それ自体として、実際の応用計算には不適でも、解析力学全体の根本的理解には必須な概念である。本研究では微分形式を使った解析力学の応用としてハミルトン・ヤコビ方程式を導出した。

もうひとつの話題として、前回の学会で発表した内容は電磁気学への応用であったが、他の連続体への応用可能性もある。相対論的な流体の解析力学表現については過去にいくつか試みがあったが、ローレンツ普遍性に問題があった。発表では本研究の解析力学的手法を流体力学に応用する可能性についても議論する。Kambe (2010) によれば、流体力学の Euler 方程式は変数を適当に選ぶことによってマクスウェル方程式と同じ形に表現できる。これを応用して、流体力学の解析力学を構築できる可能性がある。

参考文献：

- 中村匡, 物性研究, 2003 (<http://hdl.handle.net/2433/97295>)
T. Kambe 2010, Fluid Dyn. Res.
Y. Kaminaga, Electronic Journal of Theoretical Physics, 2012
(<http://www.ejtp.com/ejtpv9i26>)

キーワード: 外微分形式, 解析力学, ハミルトン・ヤコビ方程式, 流体力学

Keywords: exterior derivative, analytical mechanics, Hamilton-Jacobi Equation, fluid dynamics

東北大学太陽電波望遠鏡 AMATERAS で観測された狭帯域太陽電波 Type-IV バーストとその生成機構 Study of the slowly drifting narrowband structure in type-IV solar radio bursts observed by AMATERAS

加藤 雄人^{1*}; 岩井 一正²; 西村 由紀夫¹; 熊本 篤志¹; 三澤 浩昭³; 土屋 史紀³; 小野 高幸¹
KATO, Yuto^{1*}; IWAI, Kazumasa²; NISHIMURA, Yukio¹; KUMAMOTO, Atsushi¹; MISAWA, Hiroaki³; TSUCHIYA, Fuminori³; ONO, Takayuki¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ² 国立天文台野辺山太陽電波観測所, ³ 東北大学大学院理学研究科附属惑星プラズマ・大気研究センター

¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, ³Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University

We show the type-IV burst event observed by AMATERAS on June 7, 2011, and reveal that the main component of the burst was emitted from the plasmoid eruption identified by the EUV images of SDO. The slowly drifting narrowband structure (SDNS) appear in the spectra of the burst. By a statistical analysis, we reveal that SDNS appeared with the duration of tens to hundreds of millisecond and with the typical bandwidth of 3 MHz. For the generation mechanism of SDNS, we propose the wave-wave coupling between Langmuir waves and whistler-mode chorus emissions generated in a post-flare loop, inferred from the similarities of the plasma environments between a post-flare loop and the equatorial region of the Earth's inner magnetosphere. We assume that a chorus element with a rising tone is generated at the loop-top of a post-flare loop. By referring to the propagation properties of chorus in the magnetosphere, we assume that the chorus element propagates downward along the magnetic field line and then propagates away from the central region of the flare-loop toward the outer edge of the loop where the plasma density is relatively small. By the magnetic field and plasma density models, we quantitatively estimate the expected duration of radio emissions generated through the coupling between Langmuir waves and chorus during its propagation in the post-flare loop and find that the observation properties of duration and bandwidth of SDNS are consistently explained by the proposed generation mechanism. The characteristics of SDNS are its intermittency in time and the negative frequency drift in the limited frequency band. While observation in the terrestrial magnetosphere shows that chorus is a group of large amplitude wave elements naturally generated intermittently, the mechanism proposed in the present study can explain both intermittency and slowly drifting narrowband structure in the observed spectra.

キーワード: 太陽電波, コロナ, 波動粒子相互作用

Keywords: solar radio burst, solar corona, wave-particle interaction

高強度レーザー実験における相対論効果による種磁場形成の数値計算 Numerical simulation of magnetic field generation by relativistic effect in high intensity laser experiments

川面 洋平^{1*}; 吉田 善章¹

KAWAZURA, Yohei^{1*}; YOSHIDA, Zensho¹

¹ 東京大学新領域創成科学研究科

¹ Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

現在宇宙に存在する磁場や渦構造の起源は大きな謎である。流体描像におけるプラズマでは磁場は力学的渦と結合し、正準運動量の curl によって規定される。理想状態において渦の生成が有限であるために何らかの非完全微分の形をした項が必要となる。非相対論的理想プラズマにおいて渦を生成しうる非完全項は熱力学的な傾圧効果 $\nabla T \times \nabla \sigma$ のみである。これは Biermann の Battery 効果として知られている。しかし熱力学的傾圧効果による渦生成は熱平衡に近い状態では大きな値を持っていないため初期宇宙などでは、傾圧効果による渦生成は小さいと予想される。これに対して最近 Mahajan and Yoshida によって提唱された相対論効果による渦生成 [1] は熱平衡に近くても大きな値を持つことができるため、宇宙の種磁場形成の有力な候補になるのではないかと考えられている [2]。相対論的プラズマでは 2 つの渦生成項 $S_T = \gamma^{-1} \nabla T \times \nabla \sigma$ と $S_R = T \nabla \gamma^{-1} \times \nabla \sigma$ が存在するため、熱平衡に近く $T \nabla \sigma = \nabla \theta$ であっても、 $\nabla \gamma^{-1} \times \nabla \theta$ という渦生成項 (相対論的傾圧効果) を持つことができる。

このように理論的に予測された相対論的傾圧効果を実験的に検証することが必要とされる。最近の高強度レーザー実験では相対論的電子プラズマを生成し、またそのときに生じる磁場の高解像度な測定が行われているため [3]、レーザー実験において相対論的傾圧効果を観測することができると期待できる。本研究では相対論的プラズマの非線形数値計算を行い、レーザー実験による相対論的渦生成の検証への提言を行う。

これまでの計算結果では参考文献 [3] に妥当なパラメータ領域では相対論的傾圧効果は熱力学的傾圧効果の 10 分の 1 程度であり、相対論的傾圧効果の観測は難しいことがわかった。またプラズマの温度を上昇させるか、スキン長さ/スケールサイズを低下させることによって相対論的傾圧効果の比率を上げることができる (図)。波数空間でみると相対論的傾圧効果は熱力学的傾圧効果よりも大スケールにおいて強くなることがわかった。

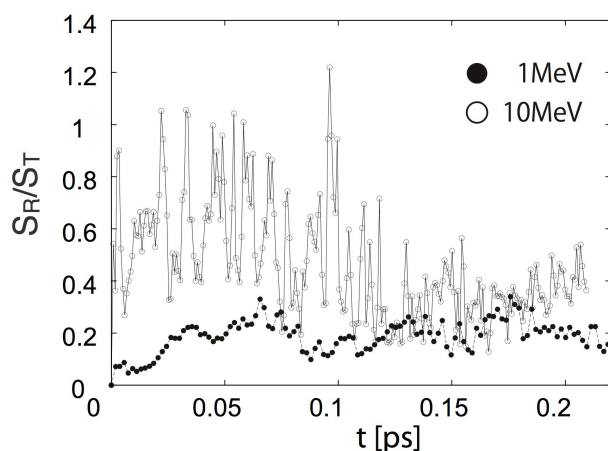
[1] S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. 105, 095005 (2010).

[2] S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Plasmas 18, 055701 (2011).

[3] S. Mondal et al., PNAS 109, 8011 (2012).

キーワード: 相対論プラズマ, 高強度レーザー実験, 磁場生成

Keywords: relativistic plasma, high intensity laser experiment, magnetic field generation



宇宙線変成衝撃波と宇宙線の生成率 The acceleration rate of cosmic rays in the cosmic ray modified shocks

斎藤 達彦^{1*}; 星野 真弘¹; 天野 孝伸¹
SAITO, Tatsuhiko^{1*}; HOSHINO, Masahiro¹; AMANO, Takanobu¹

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

¹EPS, The University of Tokyo

銀河系内で加速・生成されている銀河宇宙線は、銀河系内で起きる超新星爆発に起因する衝撃波をその起源としている。その加速メカニズムは Diffusive Shock Acceleration (DSA) 理論 [Blandford & Ostriker, 1978; Bell, 1978] として知られているが、そこには多くの理論的仮定が存在する。その一つに「被加速粒子 (宇宙線) の反作用効果」が取り入れられていない点が挙げられる。これについては Drury & Völk (1981) によって宇宙線の圧力を介した反作用効果モデルが提案されている。このモデルは背景プラズマと宇宙線を共に流体として扱うため「2 流体モデル」と呼ばれる。また、宇宙線の反作用を受け、構造を大きく変化した衝撃波は「宇宙線変成衝撃波」と呼ばれており、近年の観測からその存在が示唆されている。

他方、衝撃波加速による宇宙線の生成効率に関しては、非常に高効率で生成されているという観測 (Helder et al. 2009; Hughes et al. 2000) もある一方で、低効率であるとする観測 (Fukui 2013) もあり、統一的な見解が得られていないのが現状である。本研究では、この衝撃波での宇宙線の生成効率に関して、「宇宙線の反作用を考慮した加速メカニズム」を考えることによってその多寡を定性的に議論した。

宇宙線変成衝撃波では、上流での物理状態に対して下流の物理状態がただ一つ決まる通常の (反作用のない) 衝撃波に対して、最大で 3 つの宇宙線の生成効率の異なる状態が許され、非常に特異的なものである。

本研究では、この下流の物理状態の「多価性」に着目して、2 流体モデルを用いた数値計算による時間発展を行い、各々の時間定常状態の安定性を検証した。その結果、3 つのうち、宇宙線の生成効率が“最も高い状態”と“最も低い状態”の 2 つが安定的に存在でき、その“中間的な状態”は不安定によって“最も低い状態”へと遷移した。さらに、この特徴は 2 流体モデルに対して①磁場の効果を導入した場合も、②衝撃波面での粒子注入効果を導入した場合でも同様であった。

加えて、初期に宇宙線がない非定常な状態からの時間発展を計算すると、この 2 つの安定状態のうち生成効率が“最も低い状態”が唯一最終的な定常状態として存在できることが分かった。

キーワード: 衝撃波, 粒子加速, 宇宙線の反作用

Keywords: shocks, particle acceleration, feedback from cosmic rays

高ベータ無衝突衝撃波の2次元構造と粒子加速に関するフル粒子計算 2D Full Particle-In-Cell Simulation on a High Beta Collisionless Shock and Particle Acceleration

松清 修一^{1*}; 松本 洋介²

MATSUKIYO, Shuichi^{1*}; MATSUMOTO, Yosuke²

¹九州大学, ²千葉大学

¹Kyushu University, ²Chiba University

High beta and relatively low Mach number shocks are commonly present in a variety of space and astrophysical environments, like the earth's bow shock, the heliospheric termination shock (effective beta is rather high due to the presence of pickup ions), galaxy cluster merger shocks, etc. Even such high beta shocks show some evidences that high energy particles are possibly accelerated there. Voyager 2 spacecraft revealed that the fluxes of non-thermal electrons and ions (the latter are called as termination shock particles) are enhanced at the crossings of the termination shock. Radio synchrotron emissions from relics of galaxy cluster mergers imply the presence of relativistic electrons accelerated in the merger shocks. In this study we perform two-dimensional full particle-in-cell simulation to discuss structure of the shock as well as the acceleration process of electrons. The one-dimensional simulations performed in the past showed that under the high beta and relatively low Mach number conditions the shock is more or less laminar and time stationary and electron acceleration occurs through the so-called shock drift mechanism. Here, we reveal that two-dimensional structure of the shock is highly complex even for such a high beta and a low Mach number and further that some electrons are accelerated to high energy but their acceleration mechanism appears not to be so simple as that reproduced in one-dimensional simulations.

キーワード: 無衝突衝撃波, 数値実験, 粒子加速

Keywords: collisionless shock, numerical simulation, particle acceleration