

R008-01

C会場：11/26 AM1 (9:00-10:15)

9:00~9:15

宇宙空間中のフラットトップ分布についてのいくつかの話題

#銭谷 誠司¹⁾, 岡 光夫²⁾

(¹ オーストリア宇宙科学研究所, (² カリフォルニア大学バークレー校 宇宙科学研究所)

Some topics on the flattop velocity distributions in space plasmas

#Seiji Zenitani¹⁾, Mitsuo Oka²⁾

(¹Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, (²Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley)

A flattop distribution is one of the most characteristic non-Maxwellian velocity distributions in space plasmas. Although it is often observed in collisionless shocks and reconnection sites in near-Earth space, its basic properties are much less known. In this contribution, we summarize basic properties of the flattop distribution, with help from a generalized beta-prime distribution. Then, in order to study kinetic processes in a flattop plasma with a particle-in-cell (PIC) simulation, we propose two algorithms for generating random velocities that follows a flattop distribution. One is a piecewise rejection method, and the other is a transform method, based on gamma-distributed random numbers. We further propose a novel generator for a gamma distribution with shape parameter less than unity.

フラットトップ分布は宇宙空間における最も特徴的な速度分布関数の1つである。衝撃波やリコネクション領域などの地球近傍の宇宙空間でよく観測されているにもかかわらず、フラットトップ分布の基本的な性質はあまりよく知られていない。本稿ではまず、フラットトップ分布の基礎的な性質を統計分布（一般化されたベータプライム分布）の観点から議論する。そして、フラットトッププラズマ中の運動論的素過程をプラズマ粒子（PIC）シミュレーションで解くことを目指して、フラットトップ速度分布を乱数生成する2つの数値解法を提案する。1つは区分棄却法で、もう1つはガンマ乱数を利用した直接変換法である。このときに用いる、形状ファクターが1よりも小さなガンマ分布の乱数生成法も議論する。

R008-02

C会場：11/26 AM1 (9:00-10:15)

9:15~9:30

ラプラス演算子を用いた陽的時間領域有限差分法のクーラン条件の緩和および数値誤差の低減

#関戸 晴宇^{1,2)}, 梅田 隆行³⁾, 三好 由純²⁾

(¹ 名大工学研究科, (² 名大 ISEE, (³ 北大基盤センター

Relaxation of the Courant Condition and Reduction of Numerical Errors in the Explicit Finite-Difference Time-Domain Method

#Harune Sekido^{1,2)}, Takayuki Umeda³⁾, Yoshizumi Miyoshi²⁾

(¹School of Engineering, Nagoya University, (²Institute for Space-Earth Environment Research, Nagoya University,

(³Information Initiative Center, Hokkaido University

This study provides a new numerical method for relaxation of the Courant condition and correction of numerical errors in the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method with the time-development equations using higher-degree difference terms. The FDTD method (Yee 1966) is a numerical method for solving the time development of electromagnetic fields by approximating Maxwell's equations in both time and space with the finite difference of the second-order accuracy. A staggered grid system is used in the FDTD method, in which Gauss's law is always satisfied. Owing to this advantage, the FDTD method is used in plasma kinetic simulations for more than fifty years. In the FDTD method, however, numerical oscillations occur due to the error between the numerical phase velocity and the theoretical phase velocity. The FDTD(2,4) method (Fang 1989; Petropoulos 1994), which uses the fourth-order spatial difference, is proposed for reduction of the numerical errors. However, the Courant condition becomes more restricted by using higher-order finite differences in space and a larger number of dimensions. Recently, a numerical method has been developed by adding one-dimensional odd-degree difference terms to the time-development equations of FDTD (Sekido & Umeda, IEEE TAP, 2023; PIER M, 2024), which relaxes the Courant condition, although there exist large anisotropic numerical errors with large Courant numbers. In the present study, higher-degree difference terms including Laplacian are added to the time-development equations of FDTD(2,4) (Sekido & Umeda, EPS, 2024). The results of the test simulations show that the Laplacian operators suppress anisotropies in the waveforms and reduce the numerical oscillations. The present schemes are stable with large Courant numbers up to 1, which are able to reduce the computational time of plasma kinetic simulations significantly.

本研究では、FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法の時間発展式に対し、高階微分項を追加することで、クーラン条件の緩和および数値誤差の低減を行った。FDTD 法は、電磁場の時間発展を解く数値計算手法であり、空間および時間について 2 次精度の差分を Maxwell 方程式に適用することで時間発展式が求められる (Yee 1966)。また、staggered 格子系が採用されており、電場および磁場についての Gauss の法則が常に成り立つ。この利点により、プラズマ運動論シミュレーションの電磁場計算に 50 年以上に渡って用いられている。FDTD 法では数値的な位相速度と理論的な光速の差に依存して数値振動が生じる。この数値振動の低減のため、空間差分精度を上げた手法が提案されている (Fang 1989; Petropoulos 1994)。しかし、近似精度の上昇および空間の高次元化に伴って Courant 条件は厳しくなるという問題を抱えていた。そこで、Courant 条件の緩和と同時に数値誤差を低減させるために FDTD の時間発展式に奇数階微分項を追加する手法を開発した (Sekido & Umeda, IEEE TAP, 2023; PIER M, 2024)。この手法により Courant 条件が緩和されたが、Courant 数が大きくなるほど数値誤差が増大するという問題が残されていた。本研究では、ラプラス演算子を考慮した高階微分項を用いて新たな陽的かつ非散逸な FDTD 法を開発した (Sekido & Umeda, EPS, 2024)。テストシミュレーションの結果、ラプラス演算子の考慮により、数値誤差の異方性が大きく改善され、数値振動も大きく減少した。また、本手法は Courant 数が 1 までの範囲で安定であり、古典的な手法よりも時間ステップを大きくとることができる。これにより、本手法をプラズマ運動論シミュレーションに適用することで、大幅な計算時間の短縮が見込まれる。

R008-03

C 会場 : 11/26 AM1 (9:00-10:15)

9:30~9:45

オーロラ加速領域における電気二重層の計算機シミュレーションのための高精度手法の研究

#尾崎 理玖¹⁾, 梅田 隆行^{1,2)}

¹⁾ISEE, ²⁾ 北大基盤センター

Study of higher-degree integrators for Vlasov simulation of double layers in the auroral acceleration region

#Riku Ozaki¹⁾, Takayuki Umeda^{1,2)}

¹⁾Institute for Space&Earth Environmental Research, ²⁾Information Initiative Center, Hokkaido University

Electric fields in the acceleration region of the auroral zone have been observed via in-situ observations (e.g., Mozer et al. 1977; Ergun et al. 2001), which is known as electric double layers. The FAST observation showed detailed multi-dimensional structures of the auroral electric double layer (Ergun et al. 2001). Recently, observations by the Arase spacecraft have shown the presence of electric fields parallel to magnetic field lines in the magnetosphere at altitudes of 30,000 km (Imajo et al. 2020). Simulations of the electric fields in the auroral acceleration region have been performed by one-dimensional Vlasov equations (Newman et al. 2001). They have shown that electric double layers have been generated by a strong density depression in a current-carrying plasma.

The present study aims to reveal the formation mechanism of double layers in a current-carrying plasma by Vlasov simulations. However, it is quite difficult to perform a hyper-dimensional Vlasov simulation even on a recent supercomputer due to the lack of both computing resources and accuracy of numerical schemes. The purpose of this study is to develop a higher-degree numerical integrator for the Vlasov equation, which could reduce the number of grid points in the velocity space.

The Umeda schemes (2006, 2012) developed in the previous studies for solving the Vlasov equation have a numerical limiter that preserves non-oscillatory, positivity, and the conservation law. Although these methods have third or fourth order accuracy in space, there is a large numerical diffusion. In the present study, we develop a higher order (5th-order) method.

高度数千 km 付近のオーロラ領域において、電気二重層として知られる加速電場の存在が高度約 4,000 km のその場の衛星観測によって発見された (Mozer 1977)。また、FAST 衛星観測によってオーロラ領域の電気二重層の詳細な多次元構造が明らかにされた (Ergun et al. 2001)。さらに、最近のあらせ衛星の観測により、高度約 30,000 km の磁気圏においても磁力線に平行な加速電場の存在が示唆された (Imajo et al 2020)。一次元 Vlasov シミュレーションにより、加速電場の形成が研究されてきた (Newman et al. 2001)。Newman et al. (2001) は、電流を運ぶプラズマ中に強い密度降下を与えること (Newman モデル) によって電気二重層が形成されることを示した。

本研究では、Newman モデルによる電気二重層形成の計算機シミュレーションにより、二重層の形成メカニズムを明らかにすることを目指す。そのために、Vlasov シミュレーションのための高精度数値スキームの開発を行い、速度空間の格子点数を削減することにより計算コストの低減を試みる。

先行研究で Vlasov 方程式を解くために開発された手法 (Umeda 2006, 2012) では、密度保存および非振動性と正值性を保証するリミッタを利用していた。しかし、それらの手法は 3 次または 4 次精度のため、数値拡散による速度分布の変形が無視できなかった。そのため、本研究では 5 次精度を手法の開発を目指す。

R008-04

C会場 : 11/26 AM1 (9:00-10:15)

9:45~10:00

双極子磁場配位に向けたジャイロ運動論的シミュレーションの拡張

#渡邊 智彦¹⁾, 藤田 慶二¹⁾, 前山 伸也²⁾

(¹ 名大・理・物理, (² 核融合研

Extension of gyrokinetic simulation for the dipole field configuration

#Tomo-Hiko Watanabe¹⁾, Keiji Fujita¹⁾, Shinya Maeyama²⁾

(¹Department of Physics, Nagoya University, (²National Institute for Fusion Science

天体磁気圏やダイポール型磁場閉じ込め配位における運動論的 MHD 現象やドリフト波不安定性などの解析には、ジャイロ運動論が有効であると考えられる。しかし、これらの系では磁場強度が強い不均一性を持つために荷電粒子の運動ではミラー力が支配的となり、従来のジャイロ運動論的シミュレーションでは時間積分に強い制約が課されるため、実用上の困難があった。本研究ではその困難を克服するために磁場垂直速度成分を速度空間座標の一つとして採用する手法を新たに考案した。

従来の磁気モーメントを座標として採用する手法では、磁気モーメントに関する微分演算子を含まないという利点がある一方、双極子磁場のように磁場強度の空間変化が大きい場合には、ミラー力が非常に強くなり数値計算上の制約となる。一方、磁場垂直速度を独立変数の一つに選ぶと、断熱不変量の保存が自明的に取り入れられないことから、垂直速度に関する微分演算が陽に現れる。このため時間ステップあたりの計算コストは増大するが、時間積分のコストと速度空間解像度を大幅に向上させることが可能となる。

本研究で考案した手法は、双極子磁場中での磁気圏-電離圏結合や、放射線帯粒子が起こす運動論的磁気流体不安定性などの解析に有用である。

R008-05

C 会場 : 11/26 AM1 (9:00-10:15)

10:00~10:15

正四面体ダイナモシミュレーションの可視化

#陰山 聡¹⁾, 大野 暢亮²⁾

(¹⁾ 神戸大, (²⁾ 兵庫県立大学

Visualizations of Regular Tetrahedral Dynamo Simulation

#Akira Kageyama¹⁾, Nobuaki Ohno²⁾

(¹⁾Kobe University, (²⁾University of Hyogo

The helicity distribution of the flow plays an important role in the magnetic field amplification in an electrically conducting fluid or MHD dynamo. In standard MHD dynamo simulations, a convection system inside a sphere or spherical shell is considered, in which the rotation of the entire system induces the flow helicity. In this study, we consider the dynamo in thermal convection, without rotation, inside a regular tetrahedral domain. Our previous studies have confirmed that this system has flow helicity and that the MHD dynamo effect generates a strong magnetic field. In this talk, we will briefly introduce the newly developed simulation code for this study and then report two visualization methods developed to analyze this simulation. One is a 2-D cross-sectional visualization library that writes streamlines, arrow glyphs, etc. in SVG (Scalable Vector Graphics) format in-situ (i.e., while running the simulation). The other is an interactive in-situ visualization method based on VISMO, a 3D in-situ visualization library.

SVG visualization library: A feature of the newly developed SVG visualization library, `slice_svg`, is that it saves images in a vector graphics format, SVG. Instead of converting images to SVG via other image data formats (i.e., converting them to SVG), it outputs SVG files directly as text data. Standard Web browsers can read and display the SVG files without particular settings. In recent years, there has been a growing demand for the constant smooth display of images, such as corporate logos on web pages, on various display devices of different sizes, such as smartphones, tablet terminals, and PC displays. The growing demands of the vector image format, in which the smoothness of the image is always maintained, are behind the spread of the SVG format. However, from the perspective of visualization of simulation data, the appeal of the vector image format is not so much the smooth display of images but rather the ability to accurately describe minute structures in any amount of detail (even if they are less than one pixel on the screen before magnification). The vector glyph display function of `slice_svg` makes best use of this point. In addition, we use SVG's built-in animation function, which enables "still image with motion".

Interactive in-situ visualization: In-situ visualization, in which visualization is performed simultaneously with simulation calculation, is attractive in that it reduces the cost of data transfer and storage for post-processing, but it has the weakness that one can only obtain visualized images from a pre-specified viewpoint and visualization method. To address this problem, we previously proposed a method called "4D Street View". In this method, we scatter many omnidirectional visualization viewpoints inside a simulation domain, perform omnidirectional in-situ visualization from all of them, and analyze many generated omnidirectional videos later, interactively. While applying this method to the tetrahedral dynamo simulation, we noticed that it is more effective to distribute viewpoints densely on a specific curve than to scatter them widely in space. Thus, we developed a method to realize such a curvilinear viewpoint distribution based on the in-situ visualization library VISMO.

電気伝導性流体の流れによる磁場増幅効果、すなわち MHD ダイナモにおいては、流れのヘリシティ分布が重要である。通常の MHD ダイナモシミュレーションでは、球または球殻状の領域内部における対流系を考え、系全体が回転（自転）することで流れのヘリシティが誘起されている状況を考えることが多い。本研究では、正四面体領域内部における自転のない熱対流系でのダイナモについて考える。これまでの我々の研究で、この系が流れのヘリシティを持つこと、さらにその流れによる MHD ダイナモ効果により強い磁場が生成されることを確認している。この講演では、本研究のために新たに開発したシミュレーションコードについて簡単に紹介した後、このシミュレーションを解析するために新たに開発した二つの可視化手法について報告する。一つは in-situ で（つまりシミュレーションを実行しながら）SVG (Scalable Vector Graphics) フォーマットで流線や矢印グリフなどを書き出す 2 次元断面可視化ライブラリである。もう一つは、3 次元 in-situ 可視化ライブラリ VISMO に基づいた対話的 in-situ 可視化手法である。

SVG 可視化ライブラリ：今回開発した SVG 可視化ライブラリ `slice_svg` の特徴は、ベクター画像フォーマットである SVG 形式で画像を保存することである。他の画像データフォーマットを経由して（つまり変換して）SVG にするのではなく、SVG ファイルを直接テキストデータとして出力する。SVG 形式のファイル専用のビューアアプリを使わなくても、一般的な Web ブラウザであれば特に何も設定せずに SVG ファイルを読み込み、画像として表示させることができる。近年、スマートフォンやタブレット端末、PC のディスプレイなど大きさの異なる様々なディスプレイ装置でウェブページの例えば企業のロゴ等の画像を常に滑らかに表示する需要が高まっている。画像の滑らかさが常に維持されるベクター画像形式の重要性が高まっていることが SVG フォーマットの普及の背景にある。だが、シミュレーションデータ

の可視化に利用する観点からいえば、ベクター画像形式の魅力は、どれほど拡大しても画像が滑らかに表示されるという点よりも、微細な構造をいくらかでも詳細に（たとえ拡大前の画面上では1ピクセル以下であっても）正確に記述できる、という点に魅力がある。slice_svg のベクトルグリフ表示機能ではこの点を積極的に活用している。また、SVG にはアニメーション機能が組み込まれているので、通常の静止画用の画像フォーマットでは表現できない「動きのある静止画」可視化をすることができる。

対話的 in-situ 可視化：シミュレーション計算と同時に可視化を行う in-situ 可視化は後処理ためのデータ転送や保存のコストを削減できるという点で魅力的であるが、あらかじめ指定した視点と可視化手法で得られた可視化画像を得ることしかできないという弱点がある。この問題を解決するために我々は以前「4次元ストリートビュー」という手法を提案した。これは多数の全方位可視化視点をシミュレーション領域内部に散布させ、その全てで全方位 in-situ 可視化を行い、生成された大量の全方位動画群を対話的に分析する、という方法である。この4次元ストリートビューはあらゆるシミュレーションに応用できる汎用的な手法であるが、4次元ダイナモシミュレーションにこの手法を適用している際に、視点位置を空間的に広く散布させるよりも特定の曲線上に密に分布させる方が効果的であることに気がついた。そこでこのような曲線的視点分布を in-situ 可視化ライブラリ VISMO に基づいて実現する手法を開発した。

R008-06

C会場 : 11/26 AM2 (10:30-12:00)

10:30~10:45

カッパ分布関数をもつ高エネルギー電子によるホイッスラーモード・コーラス放射の非線形成長理論

#大村 善治¹⁾, サマーズ ダニー²⁾, 李 莉³⁾

⁽¹⁾ 京大・生存圏, ⁽²⁾ ニューファンドランド・メモリアル大学, ⁽³⁾ 中国地質大学

Nonlinear wave growth theory of whistler-mode chorus emissions induced by energetic electrons forming Kappa distribution

#Yoshiharu Omura¹⁾, Danny Summers²⁾, Li Li³⁾

⁽¹⁾Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ⁽²⁾Memorial University of Newfoundland, ⁽³⁾China University of Geoscience

In the nonlinear wave growth theory of whistler-mode chorus and hiss emissions, a Maxwellian distribution function is assumed for the momentum distribution function of energetic electrons. Both spacecraft observations and computer simulations show that the wave amplitudes and frequency ranges of chorus and hiss emissions are well described by the profiles of threshold and optimum wave amplitudes, and nonlinear growth rates as functions of frequency. Assuming Kappa-Maxwellian distribution instead of the subtracted Maxwellian distribution function, we derive the expressions of the threshold and optimum wave amplitudes and the nonlinear growth rates. We compare the profiles of these properties for Kappa-Maxwellian distribution functions. We analyze effects of enhanced high-energy tails of relativistic electrons on the nonlinear wave growth processes of whistler-mode chorus emissions outside the plasmopause and hiss emissions inside the plasmopause.

R008-07

C会場 : 11/26 AM2 (10:30-12:00)

10:45~11:00

#近藤 岳琉¹⁾, 尾崎 光紀¹⁾, 八木谷 聡¹⁾

¹⁾ 金沢大

Pitch angle diffusion coefficient of relativistic electrons using a matrix calculation in kappa-Maxwellian plasmas

#Takeru Kondo¹⁾, Mitsunori Ozaki¹⁾, Satoshi Yagitani¹⁾

¹⁾Kanazawa University

In the planetary magnetospheres, EMIC (electromagnetic ion cyclotron) waves play an important role in the energization and loss of magnetospheric plasmas. For instance, the pitch angle scattering through the cyclotron resonance with EMIC waves is a significant loss mechanism for the relativistic electrons in the Earth's outer radiation belt. The primary source for the generation of EMIC waves is a temperature anisotropy of energetic ions in the magnetosphere. This study focuses on the velocity distribution function of energetic ions to evaluate plasma diffusion coefficients of pitch angle scattering.

The conventional root finding approach for solving the plasma dispersion relations can only give one solution at one calculation root and depends on the initial parameters. To solve these calculation problems, we use a matrix approach, which can give all the important solutions of plasma dispersion relation by one matrix calculation without the initial parameters [1]. Our calculation results can give the plasma dispersion relations in bi-Maxwellian and/or kappa-Maxwellian distributions for multi-species plasmas (ions and electrons). Then, we can calculate pitch angle diffusion coefficients of plasma particles using the calculated dispersion relation for EMIC or whistler-mode waves with the parallel or oblique propagations.

We evaluate the diffusion coefficients of relativistic electrons resonated with EMIC waves, under the assumption that 8% energetic H⁺ for both the distribution of the bi-Maxwellian and the kappa-Maxwellian for kappa = 4 and the cold plasmas of H⁺, He⁺, O⁺, and e⁻. The calculation result shows that there are large decreases in the diffusion coefficient for the relativistic electrons in few energy bands only for the case of the bi-Maxwellian distribution of H⁺. This difference is caused by zero points in the group velocity in the dispersion relation using the bi-Maxwellian distribution of H⁺. The reason for the zero points in the group velocity is that the bi-Maxwellian distribution is a higher temperature anisotropy than that for the kappa-Maxwellian distribution, even in the case of the same thermal velocity in both the distributions, and the dispersion relation is more highly bent.

The bi-Maxwellian and kappa-Maxwellian of hot plasmas are important for evaluating the pitch angle diffusion coefficient of plasmas in the planetary magnetospheres (e.g., Mercury and Jupiter etc.). Thus, the matrix calculation technique for both the distribution functions can contribute to the quantitative evaluation of the plasma diffusion processes. In this presentation, we will discuss the effects of energetic particles on plasma dispersion relations and the pitch angle diffusion coefficients in detail using the matrix calculation technique.

Reference

[1] H.S. Xie, "BO: A unified tool for plasma waves and instabilities analysis", Computer Physics Communications, 244, November 2019, 343-371, doi.org:10.1016/j.cpc.2019.06.014

R008-08

C会場 : 11/26 AM2 (10:30-12:00)

11:00~11:15

低域混成高調波のサイドバンド構造に関する粒子シミュレーション

#小谷 翼¹⁾, 樋田 美栄子²⁾, 森高 外征雄²⁾, 田口 聡¹⁾

(¹⁾ 京大理, (²⁾ 核融合研

Simulation study of the sideband structure of harmonic lower hybrid waves

#Tsubasa Kotani¹⁾, Mieko Toida²⁾, Toseo Moritaka²⁾, Satoshi Taguchi¹⁾

(¹⁾ Graduate School of Science, Kyoto University, (²⁾ NIFS

Recent simulation studies have shown that the harmonic structure of lower hybrid waves (LHWs) is generated by energetic ions through non-linear wave-wave coupling (Kotani et al., 2023a; 2023b; 2024). When the LHW is excited at (k_1, ω_1) in the wavenumber-frequency plane, the harmonic structure can be characterized as $(mk_1, n\omega_1)$ where m and n are integers. In this study, using one-dimensional, electromagnetic, particle-in-cell simulations, we investigate sideband structures excited around the harmonic modes with $(mk_1, n\omega_1)$ for low ω_{pe}/Ω_e conditions. We find that complex sideband structures can be generated when the integer l ($l = [\omega_{LH}/\Omega_i]$, $0 \leq l < 1$) is close to the zero. Here, ω_{LH} is the lower hybrid resonance frequency, Ω_i is the ion cyclotron frequency, and $[x]$ is the floor function. On the other hand, such structures cannot be found when l is close to the unity.

R008-09

C会場 : 11/26 AM2 (10:30-12:00)

11:15~11:30

電子・陽電子プラズマ中の直線偏光電磁波

#岩本 昌倫¹⁾, 井岡 邦仁¹⁾

¹⁾ 京大基研

Linearly Polarized Electromagnetic Waves in Electron-Positron Plasmas

#Masanori Iwamoto¹⁾, Kunihito Ioka¹⁾

¹⁾ Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

Large-amplitude plasma waves are ubiquitous in the universe. They are subject to the non-linear wave – plasma interaction such as parametric instability, which plays a significant role for particle acceleration/heating and MHD turbulence. Recently, the non-linear wave – plasma interaction has attracted attention from astrophysics in the context of Fast Radio Bursts (FRBs). FRBs are extremely bright millisecond duration pulses at radio frequency (Lorimer et al. 2007) and often show a high degree of linear polarization (e.g., Michilli et al. 2018). Magnetars are one of the promising progenitors (e.g., Andersen et al. 2020; Lyubarsky 2021) and thus the FRB radio pulse propagates through the magnetar wind, which consists of a pair (electron – positron) plasma. The non-linear wave – plasma interaction between linearly polarized electromagnetic waves and pair plasmas must be considered for the propagation of FRB radio pulses. In this study, we analytically derive the steady-state solution of the linearly polarized electromagnetic waves in cold pair plasmas for arbitrary wave amplitude and frequency. We will demonstrate the time evolution of the steady-state solution by using the particle-in-cell simulations and discuss the effect of the non-linear wave – plasma on the propagation of FRB radio pulses.

R008-10

C会場：11/26 AM2 (10:30-12:00)

11:30~11:45

デカメータ電波パルスに基づく銀河中心極端2重星型超巨大BHの結論とそのmm波VLBIデータによる検証と敷衍

#大家 寛¹⁾

¹⁾ 東北大・理・地物

Confirmation of the Extreme Central Binary of the Super Massive Black Hole Concluded by Decameter Radio Pulse from Sgr A*

#Hiroshi Oya¹⁾

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

1. Extreme Central Binary of Super Massive Black Hole”(ECB-SMBH) at Sgr A*

The observation of the Sgr A* at the center of the Milky Way Galaxy by the decameter radio wave at 21.86 MHz started in 1983 at the Science Department of Tohoku University aiming to detect the spin periods, of black holes, which provide the characteristics of black holes such as size of the event horizon, mass, and spin parameter; from frequency modulation on the detected spin period we can find the orbital motions of black hole if they form a binary system. There are several hurdles, however, to achieve original purpose from the decameter radio wave observation for Sgr A*. These are 1) extreme low signal to noise ratio that reveals almost one 500 th because of widely expanded decameter radio wave sources in Milky Way Galaxy, 2) disruption of pulse form, carrying black hole rotation image, due to the long distant wave propagation through the Galactic space associated with plasma irregularities which cause multi path effect on propagating radio wave pulses, and 3) shifting effect of detected source direction from real direction due to the refraction of the decameter radio waves propagating through the Earth's ionosphere. After solving these problems by applying newly invented methods, we have obtained spectra of the decameter radio wave pulses from the Sgr A* with directional accuracy of 0.1 degree. By applying the method of comparison of the spectra calculated for the simulation of spinning black holes we have deciphered the observed decameter radio wave spectra; that is, Sgr A* consists of super massive black holes of a binary system whose members Gaa and Gab orbit with a period of 2200sec and with the distance of $4.1E^7$ km. BH Gaa has mass of $2.27E^6$ solar mass orbiting with velocity of 18% of the light velocity while BH Gab has mass of $1.94E^6$ solar mass orbiting with velocity of 21% of the light velocity. (see <http://hdl.handle.net/10097/00126480>) Considering the extreme characteristics of the binary at the center of the Milky Way Galaxy, we defined this system as “Extreme Central Binary of Super Massive Black Hole”(ECB-SMBH).

2. Confirmation ECB-SMBH compared with 1.3mm VLBI observation data

Confirmation of the existence of the ECB-SMBH has been made by taking coincidence of time variation in 1.3mm VLBI with model constructed with parameters concluded by the

decameter radio wave pulse observation (DRWP). The first confirmation has been made with respective to the observation results of MIT group (Fish et al. 2016) that became the origin of the start of the event horizon telescope (EHT) project; the result indicated the existence of a component of periodic variation of the mm wave radio emissions with period of 2150 sec

which coincides with the DRWP results within the estimated range of the period centered at 2200 sec. The results are given in <https://doi.org/10.33140/EESRR.05.04.05>. The second confirmation has been made by finding correlation between the orbiting model of ECB-SMBH constructed being based on DRWP observation and EHT observation data observed in 2017(EHT collaboration 2022); the results revealed high correlation rate between the DRWP model and EHT observation results with an average period of 2193 sec indicating the existence of ECB-SMBH at Sgr A*.(<https://doi.org/10.33140/ATCP.06.03.02>) Based on the

second step confirmation the moving image of ECB-SMBH has been obtained from released data of 2017 EHT campaign observation for Sgr A* with 1.3 mm VLBI applying a method of one dimensional approximation which is allowed for the ECB-SMBH orbiting in the plane parallel to (edge-on) the Galactic equatorial plane.

The disclosed images of ECB-SMBH is different from the image released by the EHT-Collaboration (2022) which is characterized by a shadow encircled by photon rings

; but our results show simple bright spots covering each BH with maximum radio brightness at the portion corresponding to the center part of the BHs.

3. Expansion of the concept of ECB-SMBH to M87*

By expanding the characteristic of the newly clarified radio source image surrounding the BH, we have explained the image as ECB-SMBH for M87* released by Miyoshi et al. in 2022 as correction to the original EHT-Collaboration's results; we have found the endorsement of this image interpretation by the different approach of M87 radio source image construction that was carried out by Lu et al. (2023) as results of 3.5 mm wave VLBI observation made by GMVA team.(see <https://doi.org/10.33140/ATCP.07.02.11>)

[研究の経過] 本研究は1984年、デカメータ電波パルスの受信に基づく天の川銀河中心ブラックホール研究として東北大学での電波受信施設によってその端緒が開かれた、1999年には東北大学理学研究科・飯館銀河電波観測設備によ

り、電波パルス信号が天の川銀河中心に存在する複数の超巨大ブラックホールの自転との同期現象に起源をもつとの結論に達していた。その後 15 年間に渡る研究継続後、デジタル位相検出を中心とする新観測方式の開発後、2016 年度及び 2017 年度に亘る観測データに基づき、対象のデカメータ電波パルスの源が 0.1 度角精度で、天の川銀河中心部に存在することを新たに実証する事となった。[極端中心 2 重星型超巨大 BH] データ解析過程では観測スペクトルを、シミュレーション法で再現、解読した結果、天の川銀河中心には質量 227 万太陽質量及び 194 万太陽質量を持つ、それぞれ仮称 Gaa 及び Gab) と呼ぶ超巨大ブラックホール・バイナリーが 2200 秒周期で公転している事が結論された。Gaa 及び Gab の公転速度はそれぞれ、光速の 18% 及び 21% の超高速で、極端中心 2 重星型超巨大 BH (ECB-SMBH) として発表している。 <http://hdl.handle.net/10097/00126480>、(2019 年)。

[重力波問題] この ECB-SMBH の存在は従来の重力波・放射理論に従うと、バイナリーが短時間で合体するという課題が生じていたが、2020~2022 年に亘る検討の結果、超巨大 BH からは重力波が発生しないと結論された。
<https://doi.org/10.33140/EESRR.06.01.01>

。即ち、超巨大 BH では重力波発生源である物質は中心部に凝縮し、事象限界とは大きく分離される。物質から放射される重力波は物質領域と事象限界の間の空間を伝搬する間に、一般相対論的時空の支配により、伝搬速度がゼロとなる進行限界圏に出会う。進行限界圏から逆行する重力波と進行波が干渉して形成される定在波はエネルギーを搬出ししない。

[極端中心 2 重星型超巨大 BH の検証 (1)] 2017 年に 1.3mm VLBI による天の川銀河中心のブラックホール Sgr A* を取り巻く電波源像を撮像するのを目的に国際 (EHT) プロジェクト研究が立ち上げられ、本研究では、極端中心 2 重星型超巨大 BH の結論を検証するため 1.3mm VLBI 観測結果との対比検討をおこなった。検証の第一ステップは、EHT の前身となる MIT の観測データに対し対比を試み当研究が 発表してきた公転周期 2200 秒の下限に相当する 2015 秒にて公転するモデルとの一致を確認し、2022 年に発表している。<https://doi.org/10.33140/EESRR.05.04.05>

続いて 2022 年度は EHT 共同研究グループ (EHTC) による公開データに対し、当研究が結論している、周期に極めて近い平均 2193 秒で公転しているモデルに対する時間変動が一致することが示され、結果を 2023 年発表している。
<https://doi.org/10.33140/ATCP.06.03.02>

[極端中心 2 重星型超巨大 BH の検証 (2)] EHT による 1.3mm VLBI 観測結果との対比は更に、EHT 公開データから公転周期 2153 秒を基に極端中心 2 重星型・超巨大 BH の運行を示す動画像を得た。この場合、軌道面が直線運動になる位置関係が判明し、一次元近似にて BH の往復運動としてコマ取画像を完成している。本研究の結果の特徴は EHT グループが描いた電波源像、即ち、BH に対応する影を環状電波源が取り巻く形の像と異なり、単純に BH を包んで輝くスポット電波源である事を示した事にある。そこで、本研究では検証の拡大として、新しい電波源像を 2022 年 Miyoshi et al, (2022) による M87*(M87 銀河中心の BH), の電波源像 (EHT グループの結果の誤りを訂正して発表された) の理解に敷衍し、M87*BH (総質量が 65 億倍太陽質量) が Sgr A* と同じ範疇の極端中心 2 重星型・超巨大 BH であると結論した <https://doi.org/10.33140/ATCP.07.02.11>。(2024 年 6 月出版)。

R008-11

C会場：11/27 AM1 (9:00-10:15)

9:00~9:15

大型レーザー実験を用いた非定常無衝突衝撃波の研究

#松清 修一¹⁾, 諫山 翔伍¹⁾, 佐藤 弓真²⁾, 高橋 佳夏²⁾, 森田 太智¹⁾, 竹崎 太智³⁾, 山崎 了⁴⁾, 田中 周太⁴⁾, 境 健太郎⁵⁾, 蔵満 康浩⁶⁾, 富田 健太郎⁷⁾, 佐野 孝好⁸⁾, 坂和 洋一⁸⁾

(¹⁾ 九大・総理工, (²⁾ 九大, 総理工, (³⁾ 富山大学, (⁴⁾ 青学大, (⁵⁾ 核融合科学研究所, (⁶⁾ 阪大・工・電気, (⁷⁾ 北海道大学, (⁸⁾ 阪大レーザー研

Study of nonstationary collisionless shock using high-power laser experiment

#Shuichi Matsukiyo¹⁾, Shogo Isayama¹⁾, Yuma Sato²⁾, Kana Takahashi²⁾, Taichi Morita¹⁾, Taichi Takezaki³⁾, Ryo Yamazaki⁴⁾, Shuta Tanaka⁴⁾, Kentaro Sakai⁵⁾, Yasuhiro Kuramitsu⁶⁾, Kentaro Tomita⁷⁾, Takayoshi Sano⁸⁾, Youichi Sakawa⁸⁾

(¹⁾ Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, (²⁾ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, (³⁾ University of Toyama, (⁴⁾ Aoyama Gakuin University, (⁵⁾ National Institute for Fusion Science, (⁶⁾ Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, (⁷⁾ Hokkaido University, (⁸⁾ Institute of Laser Engineering, Osaka University

One of the characteristics of so-called supercritical shocks in space, where the Alfvén Mach number exceeds approximately 3, is the non-stationary behavior of the shock front. Shock front non-stationarity can trigger active wave excitation and particle acceleration, and it is believed to potentially contribute to the generation of non-thermal particles that serve as seed particles for shock Fermi acceleration. Various factors could be the origin of the non-stationarity, but in the case of quasi-perpendicular shocks, numerical simulations suggest that periodic non-stationarity dependent on the dynamics of reflected ions appears. Numerical simulations have shown that excitations of various types of waves occur in conjunction with ion reflection, and related particle acceleration is also observed. In-situ observations in space have captured various phenomena likely due to periodic fluctuations of the shock front, but it is challenging to continuously track and observe the shock front itself over extended periods. Therefore, this study aims to generate supercritical shocks in a laboratory and perform long-duration measurements to directly capture the periodic fluctuations of the shock front. This report presents the current status of the research.

アルフベンマッハ数が3程度を超えるいわゆる超臨界衝撃波の特徴のひとつに、波面の非定常的振る舞いがある。衝撃波非定常性は活発な波動励起や粒子加速を引き起こし、とくに衝撃波フェルミ加速の種粒子となる非熱的粒子の生成に寄与する可能性があると考えられている。非定常性の起源としてさまざまな要因があり得るが、準垂直衝撃波の場合には反射イオンのダイナミクスに依存した周期的な非定常性が現れることが数値シミュレーションにより示唆されている。シミュレーションでは、イオンの反射に付随して多様な波動励起が見られたり、それに関連して粒子加速が起こることが確認されている。宇宙のその場観測でも、波面の周期的変動に起因すると思われるさまざまな現象が捉えられているが、波面そのものを長時間にわたり追跡して観測することは難しい。そこで本研究では、実験室内に超臨界衝撃波を生成して長時間計測することで、波面の周期的変動を直接捉えることを試みる。研究の現状について報告する。

R008-12

C会場 : 11/27 AM1 (9:00-10:15)

9:15~9:30

取下げ

R008-13
C 会場 : 11/27 AM1 (9:00-10:15)
9:30~9:45

#王 若琳¹⁾, 天野 孝伸¹⁾
(¹ 東大)

Investigating wave generation mechanisms driven by shock-reflected electrons at quasi-perpendicular shocks

#RUOLIN WANG¹⁾, Takanobu Amano¹⁾
(¹University of Tokyo)

Diffusive shock acceleration (DSA) is the primary mechanism for generating high-energy particles in supernova remnant shocks. Still, it faces challenges in efficiently accelerating low-energy particles, known as the injection problem. Stochastic shock drift acceleration presents a promising solution, suggesting that whistler waves in the shock transition region are essential for accelerating low-energy electrons (Amano et al., 2022). However, the origins of waves in the transition region remain elusive. Non-Maxwellian electron velocity distributions, generated by mirror reflection at quasi-perpendicular shocks, such as Maxwellian ring-beam distributions, serve as potential free energy sources to create plasma waves (S. M. Khorashadizadeh et al., 2019; Karlicky, 2006).

In our study, we focus on the electron distribution in the upstream and transition regions of shocks, where positive gradient regions resembling ring-beam distributions can potentially generate whistler waves. We are currently developing a method to calculate the linear growth rate of instabilities driven by such distributions. Initially, we estimate the electron distribution based on the model upstream and downstream distributions, incorporating shock structure under the assumptions: (1) immobile ions, (2) incoming upstream electron distribution as Maxwellian, (3) downstream electron distribution as a flat-top distribution, and (4) cross-shock potential approximately 20% of the ion inertial energy. According to the shock drift acceleration model (Wu, 1984), some upstream electrons bounce back by the magnetic forces, creating a "loss cone". Additionally, some downstream electrons can leak into the upstream region. With these assumptions, we can estimate the electron velocity distribution in the shock transition region via Liouville mapping.

Then we proceed to calculate the linear dispersion relation for the distribution. Typically, the standard linearized Vlasov-Maxwell solver is applied to solve the linear dispersion relation for relatively simple analytic velocity distributions, such as bi-Maxwellian or Maxwellian ring-beam distributions (Umeda et al., 2012). However, solving the dispersion relation for our model distribution by the standard method is challenging due to its complexity. To address this, we use the semi-analytical method proposed by Kennel & Wong (1967) to calculate the growth/damping rate of waves. This method applies to arbitrary velocity distributions, provided the growth/damping rate is significantly smaller than the frequency's real part.

By combining these, we can investigate the wave generation mechanisms and resulting particle acceleration for arbitrary shock parameters. We validated our method by comparing dispersion relations derived from our semi-analytical approach with those obtained from fully numerical simulations of Maxwellian distributions under conditions of parallel propagation. In future work, we will compare our theoretical analyses with simulations to explore the dependence of growth or damping rates on shock parameters and investigate the mechanisms of whistler wave generation in shock regions.

R008-14

C 会場 : 11/27 AM1 (9:00-10:15)

9:45~10:00

相対論的衝撃波における Buneman 不安定性による電子加熱効率の評価

#福田 悠斗¹⁾, 天野 孝伸¹⁾

¹⁾ 東大

Evaluation of Electron Heating Efficiency by Buneman Instability in Relativistic Shock Waves

#Yuto Fukuda¹⁾, Takanobu Amano¹⁾

¹⁾University of Tokyo

Observations suggest the presence of high-temperature electrons in many relativistic shock waves, such as in gamma-ray bursts and AGN jets. However, the mechanism by which high-temperature electrons are produced in relativistic shock waves is not known. To investigate how the upstream flow kinetic energy is converted to the thermal energy in the downstream, it is necessary to study the energy dissipation that occurs in the shock transition layer between the upstream and downstream.

In the shock transition layer, various instabilities are generated, and particles are efficiently heated. In this study, we focus on the Buneman instability, an electrostatic instability that occurs when electrons and ions have relative velocities.

Several simulations have been performed to study the instability in the relativistic regime, which heat electrons [Dieckmann et al. 2008]. However, the saturation level is not well understood, and it is not known how much of the kinetic energy of relativistic shock waves is distributed to electrons.

We employed a local model with periodic boundary conditions and performed 1D particle-in-cell (PIC) simulations that mimicked the foot region of the shock transition layer. Three components (incident ions, reflected ions, and electrons) exist in the simulation box, and their current-neutral and charge-neutral conditions are assumed. First, we confirmed that the time evolution of the electric field energy in the linear phase is consistent with the linear theory obtained from the relativistic dispersion relation. We then confirmed that electron holes were always generated in the saturation phase. Furthermore, we found the saturation level decreases with increasing the shock velocity in the relativistic regime.

In the non-relativistic regime from simulations [Leroy et al. 1982] and observations [Bame & Gosling, 1983] the fraction of reflected ions. However, it is not certain that the 20% adopted as the fraction of reflected ions in relativistic shock waves is appropriate. As a future work, we will investigate the dependence of the fraction of reflected ions in relativistic shock waves on shock wave velocity using simulations.

ガンマ線バーストや AGN ジェットなど、多くの相対論的衝撃波において高温の電子の存在が観測から示唆されている。しかし、相対論的衝撃波において高温の電子がどのようなメカニズムで生成されるかはわかっていない。上流の流体の運動エネルギーがどのように下流の熱エネルギーへ変換されるのかを調べるには、上流と下流の間にある衝撃波遷移層で起こるエネルギー散逸を調べる必要がある。衝撃波遷移層では、衝撃波によって様々な不安定性が生じ、粒子が効率的に加熱されることが知られている。本研究では電子とイオンの間で相対速度を持つ場合に生じる静電的な不安定性である Buneman 不安定性に注目する。

相対論領域の不安定性を調べるシミュレーションは過去にも行われており、電子を加熱することが知られている [Dieckmann et al. 2008]。しかし、飽和レベルや電子へのエネルギー分配比率の衝撃波速度依存性はわかっていない。

そこで我々は周期的な境界条件を持つ局所モデルを採用し、衝撃波遷移層の foot 領域を再現した 1 次元 PIC (Particle-in-Cell) シミュレーションを実施した。シミュレーション領域内には入射イオン・反射イオン・電子の 3 成分が存在し、それらの電流中性・電荷中性条件を仮定し、反射イオンの割合は典型的な値である 20% を採用した。初めに電場の持つエネルギーの時間発展が線形段階において、相対論的な分散関係式から得られる線形理論と一致することを確認した。また、飽和段階では電子ホールが生成されることを確認した。さらに、衝撃波速度が相対論的になると飽和レベルが下がっていく結果を得た。

非相対論領域では入射イオンと電子が作るポテンシャルによってどれだけ反射イオンが作られるのか、シミュレーション [Leroy et al. 1982] や観測 [Bame & Gosling, 1983] からわかっている。しかし、相対論的衝撃波の反射イオンの割合として採用した 20% が妥当であるか確かではない。今後の発展として、相対論的衝撃波における反射イオンの割合の衝撃波速度依存性をシミュレーションを用いて調べる。

R008-15

C会場 : 11/27 AM1 (9:00-10:15)

10:00~10:15

#寺境 太樹¹⁾, 天野 孝伸¹⁾

⁽¹⁾ 東大, ⁽²⁾ 東大

Electron Heating in Relativistic Collisionless Shocks

#Taiki Jikei¹⁾, Takanobu Amano¹⁾

⁽¹⁾The University of Tokyo, ⁽²⁾University of Tokyo

High-energy electrons downstream of shocks are the source of bright emissions from various astrophysical objects, such as supernova remnants (SNRs) and gamma-ray bursts (GRBs). Although previous studies have discussed the physics of electron heating for some parameters, such as unmagnetized ultra-relativistic shocks relevant to GRBs, a general understanding of a wide range of parameters still needs to be provided.

Using the supercomputer Fugaku, we have run high-resolution, high electron-to-ion mass ratio particle-in-cell (PIC) simulations of different shock Lorentz factors and magnetizations. We show that electrons are heated very efficiently in strongly magnetized ultra-relativistic and unmagnetized shocks. However, electrons can still be heated to $\sim 10\%$ of ion energy in other parameters.

We also discuss applications to highly magnetized mildly relativistic shocks, a parameter relevant to persistent radio emissions of fast radio burst (FRB) but have yet to be investigated in detail.

R008-16

C会場 : 11/27 AM2 (10:30-12:00)

10:30~10:45

#天野 孝伸¹⁾

¹⁾ 東大

Ion-driven and electron-driven waves in Earth's bow shock

#Takanobu Amano¹⁾

¹⁾University of Tokyo

The collisionless shock involves various kinds of plasma instabilities in its transition layer, ranging from the smallest Debye scale to the magnetohydrodynamic (MHD) scale. Understanding the instabilities and the generated wave properties is crucial for the physics of collisionless dissipation at the shock. The acceleration of non-thermal particles through the standard diffusive shock acceleration (DSA) and the more recently proposed stochastic shock drift acceleration (SSDA) require a certain level of electromagnetic fluctuations, most likely driven by plasma instabilities.

While there has been a long discussion of kinetic instabilities in and around the shock transition layer, instability analyses have typically been performed on a case-by-case basis under simplifying assumptions such as spatial homogeneity. The actual transition layer of the shock is much more complicated, with highly inhomogeneous density and magnetic field structures. It is also likely that waves of different types interact nonlinearly with each other. Although in-situ observation at Earth's bow shock provides valuable information for understanding complicated nonlinear phenomena, it is often difficult to disentangle physics from observation alone.

We present the result of Particle-In-Cell (PIC) simulations of collisionless quasi-perpendicular shocks for the parameter regime relevant to Earth's bow shock. We find various wave activities, including electrostatic ion-acoustic-like waves, quasi-parallel and oblique whistler waves, and Alfvén-ion-cyclotron waves. We compare shocks of different ion plasma betas with all the other parameters being fixed. The intention of this comparison is to separate the sources of waves, i.e., either ion-driven or electron-driven. The higher ion beta shocks are more laminar and dominated by whistler waves likely generated by electrons. On the other hand, large amplitude and low-frequency magnetic fluctuations dominate the shocks of lower ion beta, suggesting that the reflected ions are the source of instability. We discuss the impact of the ion-driven waves on the electron-driven waves and possible ways to distinguish the waves of different origins.

R008-17

C会場：11/27 AM2 (10:30-12:00)

10:45~11:00

電子-イオン-陽電子3成分プラズマにおける相対論的衝撃波による陽電子の選択的粒子加速

#荒井 翔吏¹⁾, 松本 洋介²⁾

(¹ 千葉大学, (² 千葉大高等研究基幹

A preferential positron acceleration in relativistic magnetized shocks in electron-positron three-component plasma

#Shori Arai¹⁾, Yosuke Matsumoto²⁾

(¹Graduate School of Science and Engineering, Chiba University, (²Institute for Advanced Academic Research, Chiba University

Positron excess is one of the open questions about cosmic rays. Observational evidence from PAMERA, Fermi-LAT, and AMS-02 indicated that the ratio of positrons to electrons (positron fraction) over 10 GeV is higher than theoretical models based on a secondary origin. This reveals the existence of extra sources of primary cosmic-ray positrons. To solve the acceleration mechanisms of cosmic rays, relativistic perpendicular shocks in two-component (electron-positron or ion-electron) plasma have been studied with particle-in-cell (PIC) simulations. It has been confirmed that electrons are accelerated by the Weibel instability (WI) in electron-positron plasma and by the wakefield acceleration (WFA) in ion-electron plasma. Some simulations of relativistic electron-ion-positron shocks have also been conducted. In moderate magnetizations, both electrons and positrons are nonthermally accelerated by absorbing the high harmonic ion cyclotron waves emitted by the ions. Though they are equally accelerated during large positron fractions, positrons are more efficiently accelerated as the positron fraction decreases (Hoshino et al. 1992; Amato & Arons 2006; Stockem et al. 2012). Under low but finite magnetizations, electrons are accelerated via the first-order Fermi process only when the external magnetization is below a critical value, but in the limit of vanishing external magnetization, both ions and electrons are accelerated due to scattering off the intense magnetic cavities (Grošelj et al. 2022). However, there are parameter spaces in three-component plasmas that have not yet been fully studied, such as the case when the positron fraction is small and when the magnetization is large. In this study, we show the results of one-dimensional PIC simulations of relativistic electron-ion-positron shocks and compare results with the positron excess.

When σ , which is the ratio of the Poynting flux to the kinetic energy flux, become $\sigma \sim 0.1$, Electrons are accelerated by the wakefield produced by precursor waves, as reported in case of ion-electron shocks. However, positrons are accelerated by a cyclotron resonance with the emitted waves and also by the wakefield in the opposite polarity. When $\sigma \geq 1$, we found that electrostatic fields are generated by separations between a pair shock and an ion shock and cause particle accelerations like by the wakefield. Moreover, comparing the energy spectra of electrons and positrons, we found that those of positrons have peaks in higher energies than those of electrons. In this presentation, we report the relations between preferential positron accelerations in relativistic electron-ion-positron shocks and positron excess.

宇宙線に関する未解決問題として陽電子過剰がある。PAMELA や Fermi-LAT、AMS-02 といった観測では、10 GeV 以上の陽電子の割合が二次宇宙線の理論モデルよりも大きいことが分かり、一次宇宙線としての陽電子の発生源が存在していることが示唆された。宇宙線加速の研究手法の1つとしては、相対論的衝撃波の PIC シミュレーションがある。過去の研究では、電子-陽電子プラズマではワイベル不安定によって、イオン-電子プラズマでは航跡場加速によって電子が加速されていることが確認された。電子-イオン-陽電子3成分プラズマでは中程度の磁場強度の場合、電子、陽電子ともにイオンから放射される高次高調波イオンサイクロトロン波を吸収して加速される。陽電子の割合が大きい場合は電子も陽電子も等しく加速されるが、陽電子の割合が小さくなるにつれて陽電子の方がより効率的に加速される (Hoshino et al. 1992; Amato & Arons 2006; Stockem et al. 2012)。一方、弱磁場の場合はある閾値より磁場強度が小さいときに1次フェルミ過程を経て粒子加速が起こり、磁場がない場合は強い磁気空洞が形成され、それに散乱されることで粒子加速が起こることが分かっている (Grošelj et al. 2022)。しかし、陽電子の数が少ない場合や磁化が大きい場合など、3成分系プラズマ系における衝撃波粒子加速の研究はまだ限られている。本研究では、電子-イオン-陽電子の3成分プラズマにおける相対論的衝撃波による電子と陽電子の加速に関する1次元 PIC シミュレーション結果を陽電子過剰との比較を交えつつ議論する。

ポインティングフラックスと上流運動エネルギーの比 σ が $\sigma \sim 0.1$ のとき、電子はこれまで電子-イオンプラズマで報告されていた様に先駆波による航跡場で加速されるが、陽電子は衝撃波から放射される電磁波による共鳴加速と衝撃波の進行と逆向きの航跡場によって加速されることが分かった。また $\sigma \geq 1$ の強磁場環境では、電子-陽電子衝撃波とイオン衝撃波の分離によって静電場が発生し、航跡場と同様の粒子加速が存在することを新たに発見した。さらに、電子と陽電子のエネルギースペクトルを比較したところ、陽電子の方がより高エネルギー側にピークを持つことを発見した。本発表では、3成分系プラズマにおける陽電子の選択的な加速と陽電子過剰の関連性についての詳細を報告する。

R008-18

C会場：11/27 AM2 (10:30-12:00)

11:00~11:15

連結階層シミュレーションを用いた無衝突プラズマにおけるプラズモイド不安定型磁気リコネクションモデルに関する研究

#芥川 慧大¹⁾, 今田 晋亮¹⁾

¹⁾ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

A study of plasmoid unstable magnetic reconnection model in collisionless plasma by multi-hierarchy simulation

#Keita Akutagawa¹⁾, Shinsuke Imada¹⁾

¹⁾ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

Magnetic reconnection converts magnetic field energy into plasma energy by changing the topology of magnetic field lines and it is a universal phenomenon in the universe, for example in the Earth's magnetosphere and the solar corona.

An open question in magnetic reconnection is the connection between the fluid and kinetic scales. In 2007, plasmoid instability was found that can explain fast magnetic reconnection in uniform resistivity in the framework of MHD, and it is expected to be applicable to solar flares. On the other hand, the solar coronal plasma should be treated as collisionless plasma when the current sheet becomes thin. In collisionless plasma, fast magnetic reconnection is realized by Hall effect. The size of a solar flare is about 10 Mm, while the dissipation region (~ion inertial length) is about 1 m. Therefore, it is not obvious whether the fast magnetic reconnection due to the Hall effect holds up to the solar flare scale, or the plasmoid instability arises at certain scales. We try to solve this problem by numerical simulation, but it is computationally impossible to realize solar flare scale in PIC simulation that can describe the plasma kinetics. MHD simulation is also inappropriate because they cannot describe the resistivity from first principles, which means the magnetic field dissipation due to the resistivity is artificially given that the system can be either Petschek-type or plasmoid unstable type magnetic reconnection.

In this study, we adopted the multi-hierarchy simulation to overcome this large scale gap and developed simulation code from scratch. This is a method to reduce the computational cost by using PIC simulation in the region where plasma kinetics is important, while other region is treated by MHD simulation. Although the actual solar flare scale cannot be handled at this stage, we set largest possible box size (100~1000 ion inertial lengths, with NVIDIA A100 GPU) and connected MHD and PIC in the inflow region. As a result, only one secondary plasmoid was generated in the electron diffusion region. It is different from the picture of plasmoid instability which many plasmoids are generated in the diffusion region. Furthermore, we will discuss the possible box size in the future.

磁気リコネクションとは、磁力線のトポロジーが変化することで磁場のエネルギーをプラズマのエネルギーに変換する物理過程であり、地球磁気圏や太陽コロナなど宇宙の様々な領域で起こる普遍的な現象である。

磁気リコネクション研究における未解決問題として、高速磁気リコネクションの物理及び運動論スケールと流体スケールの接続がある。2007年にMHDの枠組みで、一様抵抗の下で高速磁気リコネクションを説明できるプラズモイド不安定が発見され、太陽フレアに適用できると期待されている。一方で、太陽コロナは衝突優勢なプラズマで満たされているものの、カレントシートが薄くなると無衝突プラズマとして扱う必要がある。無衝突プラズマ中ではHall効果によって高速磁気リコネクションが実現されるが、太陽フレアのサイズはO(10 Mm)である一方で散逸領域(イオン慣性長程度)はO(1 m)となり、大きなスケールギャップがある。そのため、Hall効果による高速磁気リコネクションの描像が太陽フレアスケールまで保たれるのか、または特定のスケールでプラズモイド不安定のような構造になるのかは自明でない。我々は数値シミュレーションによるアプローチでこの問題の解決を試みているが、プラズマ運動論を記述することのできるPICシミュレーションで太陽フレアのスケールを扱うことは計算コスト的に不可能である。またMHDシミュレーションでは、抵抗による磁場散逸を人為的に与えるためPetschek型にもプラズモイド不安定型にもできてしまい、抵抗を第一原理的に記述できないため不適當である。

今回、この大きなスケールギャップを乗り越える手法として連結階層シミュレーションを採用し、そのコード開発を一から行った。これはプラズマ運動論が重要になる領域PICシミュレーションで扱いつつ、他の領域はMHDシミュレーションで扱うことで計算コストを抑える手法である。現段階で実際の太陽フレアスケールは扱えていないが、可能な限り大きなボックスサイズ(100~1000イオン慣性長、計算資源:NVIDIA A100 GPU)を用意し、インフロー領域でMHDとPICを接続した。結果として、2次のプラズモイドは電子拡散領域から1つだけ生成されるものであり、拡散領域から多数のプラズモイドが生成されるプラズモイド不安定の描像とは異なるものであった。本発表では、以上の内容に加えて、将来的に実現可能なボックスサイズについても議論する予定である。

R008-19

C 会場 : 11/27 AM2 (10:30-12:00)

11:15~11:30

テアリング不安定性の MHD 線形理論のまとめ

#清水 徹¹⁾

¹⁾RCSCE, 愛媛大

Summary of MHD Linear Theory for Tearing Instability

#Tohru Shimizu¹⁾

¹⁾RCSCE, Ehime University

Magneto-hydrodynamic (MHD) linear theory of tearing instability is summarized, which was studied by the author during the past 8 years. The linear theory has the history of 60 years, which started from FKR theory (Fruth,PhF11963). The author's theory is based on the LSC theory (Loureiro,PoP2007) and was largely developed by author. Finding some innovative topics, viscosity and hyper resistivity were incorporated and WKB approximation was improved. For example, the so-called trigger problem has been solved in the MHD viewpoint.

著者により過去 8 年間なされてきたテアリング不安定性の磁気流体 (MHD) 線形理論の研究が総括される。その理論は LSC 理論 (Loureiro,PoP2007) をベースとして、著者により大きく発展された。過去 60 年続けられてきたこの研究分野において、著者はいくつかの革新的な知見を得つつ、粘性効果や Hyper Resistivity を導入し、さらに WKB 近似が改良した。例えば、トリガ問題を MHD の視点から解いた。今後の発展研究の方向性についても議論する。

R008-20

C会場：11/27 AM2 (10:30-12:00)

11:30~11:45

相対論的磁気流体計算における機械学習モデルの導入

#松本 洋介¹⁾, 松本 仁²⁾, 高橋 博之³⁾

(¹⁾ 千葉大学, (²⁾ 福岡大学, (³⁾ 駒澤大学

Implementation of a machine learning model into the relativistic magnetohydrodynamic simulation code

#Yosuke Matsumoto¹⁾, Jin Matsumoto²⁾, Hiroyuki Takahashi³⁾

(¹⁾ Chiba University, (²⁾ Fukuoka University, (³⁾ Komazawa University

Relativistic magnetohydrodynamic (RMHD) simulation has been widely used to understand high-energy astrophysical phenomena. Modern RMHD codes adopt the finite volume method, which requires conserved variables (momentum, total energy, etc.) and primitive variables (velocity, pressure, etc.). However, the RMHD equations require the numerical solution of nonlinear equations to obtain the primitive variables from the conserved variables. The algorithm used for solving the nonlinear equation is one of the factors that determine numerical stability. The Newton-Raphson method is commonly adopted for solving nonlinear equations, but the problem of how to give an initial guess remains. In simulations that follow the time evolution, the value of the previous time step is often chosen as the initial guess. However, this is shown to be numerically unstable in simulating high-energy astrophysical phenomena. A method proposed by Mignone and McKinney [2007], which uses a solution of the quadratic equation for the enthalpy, has been widely used in such simulations.

This study proposes a method in which a machine learning model gives the initial guess in the primitive variable conversion. We created a large training data set by algebraically obtaining conserved variables from randomly generated primitive variables. Then, we inverted them to train a neural network (NN) that predicts the primitive variables using the conserved variables as input. The parameters of the trained NNs were incorporated into the special relativistic MHD code (Matsumoto and Masada, 2019), and results were compared using different methods for the initial guess. As a result, we obtained the same results as the previous method in benchmark tests of the 1D shock tube problem and the 2D Rotor problem. As an application to practical problems, we also applied the method to a relativistic jet propagation from a massive star. We found that the new method resulted in fewer iterations.

Issues in implementing NNs in numerical codes include prediction accuracy for input parameters outside the parameter range of the training data and the trade-off between computational cost and prediction accuracy. Therefore, we also developed a symbolic regression (SR) model as an alternative machine learning model to NNs, which learns nonlinear functions represented by a NN as mathematical expressions. In this study, we used the above training data and the PySR library (Cranmer, 2023) to estimate an equation that expresses the primitive variable conversion. This talk reports the NN's performance and the SR model's development status.

宇宙における高エネルギー現象を明らかにする上で、相対論的磁気流体 (RMHD) シミュレーションは欠かせない技術となっている。近年広く使われる RMHD コードには、衝撃波捕捉法を組み込んだ有限体積法が広く採用されている。方程式を保存形式で解く本手法は、保存変数 (運動量、全エネルギーなど) と基本変数 (速度、圧力など) を保持する必要があるが、RMHD 方程式系では保存変数から基本変数を求めるために非線形方程式を数値的に解く必要があり、そのアルゴリズムが数値的安定性を決める要因の1つとなっている。非線形方程式を解く手法としてニュートン・ラフソン法による反復法が採択されるが、初期推測値をどのようにして与えるかという一般の問題が残される。時間発展を追うシミュレーションでは、前時間ステップの値を初期推測値として選ぶ方法がしばしば取られるが、ダイナミックに変動する高エネルギー現象の計算では数値的に不安定であることが示される。そのような中、エンタルピーに関する2次方程式の解を初期値とする、Mignone and McKinney [2007] で提案された手法が一定の成功を収めている。

本研究では、基本変数変換における初期推測値を機械学習モデルの予測で与える手法を提案する。ランダムに生成した基本変数から保存変数を代数的に求めることで学習データを大量かつ高速に作成し、それらを反転して、保存変数を入力として基本変数を予測するニューラルネットワーク (NN) を設計・学習した。学習済みの NN のパラメータを特殊相対論 MHD コード (Matsumoto and Masada, 2019) に取り組み、初期推測値の推定法による比較を行った。その結果、1次元衝撃波管問題、2次元 Rotor 問題等のテスト計算で従来の手法と同じ結果を得ることができた。また、実問題への応用として、大質量星を突き破る相対論的ジェット伝搬計算にも適用し、より少ない反復回数で計算が可能であることがわかった。

NN の数値コードへの実装の課題として、学習範囲外の入力パラメータに対する予測の不安定さ、計算コストと予測性能のトレードオフ、が挙げられる。そこで、NN に変わる機械学習モデルとして、関数同定 (symbolic regression, SR) モデルの構築も進めた。SR は NN が表現する非線形関数を数式として学習するもので、解釈性、予測速度を課題とする NN

に対する代替モデルとなりうる。本研究では、上記学習データと PySR ライブラリ (Cranmer, 2023) を用いて、保存変数から基本変数を予測する数式推定を行った。本発表では、NN の実装性能および SR モデルの開発状況について報告する。

R008-21

C会場：11/27 AM2 (10:30-12:00)

11:45~12:00

地球磁気圏自律システムとしてのケルビンヘルムホルツ不安定

#蔡 東生¹⁾

⁽¹⁾ 筑波大・シス情

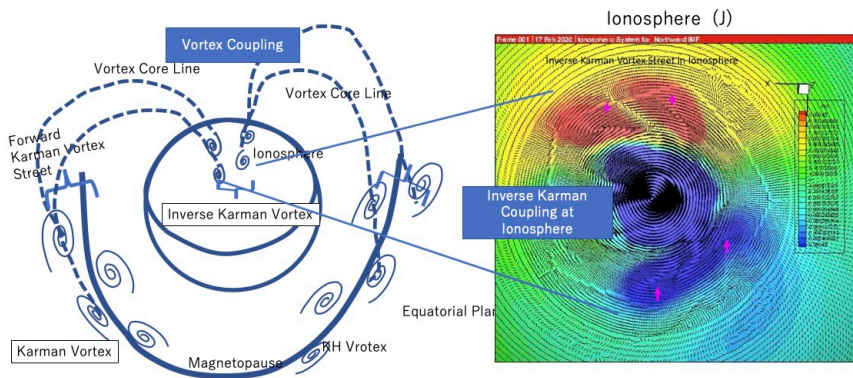
Autonomous Kelvin-Helmholtz Vortex-Generating System in the Earth's Magnetosphere

#DongSheng Cai¹⁾

⁽¹⁾Institute of System and Information, University of Tsukuba

Recently, a prolonged simultaneous observation of the Kelvin-Helmholtz (K-H) wave on the dawn and dusk magnetopauses by the Magnetospheric Multiscale (MMS) and THEMIS-A (THA) spacecraft has been reported in numerous papers (e.g., Lu et al., 2019). The wave periods vary on both flanks, with similar average periods of 303 ± 107 s for MMS and 266 ± 102 s for THA. The lag time between the variations in the wave periods is close to the wave propagation time from THA to MMS, which suggests that the K-H waves are generated and propagate quasi-symmetrically on both flanks. However, vortex induction between two different rows at dawn and dusk over such a large distance is unlikely.

To address this mysterious induction between these two rows of vortices, we must first understand that Kelvin-Helmholtz instability (referred to as K-H instability) in its initial stage is a linear shear instability (Chandrasekhar, 1968). These linear transverse vortices grow within the shear layers, and once the growth of linearly unstable modes saturates, the vortices shed off from the shear layers and become what are referred to as free vortices. The core lines of these shed free vortices extend along the outermost magnetic field lines. These vortices extend from both the dusk and dawn sides of the magnetosphere and confront each other in both polar regions. Thus, the induction coupling of two different rows of dawn and dusk vortices occurs near the polar regions. However, these vortices do not rotate in opposite directions; instead, they rotate in the same direction to form what is known as an “inverse Karman vortex street.” The inverse Karman vortex streets are sustained by propulsive flow related to polar lobe reconnections. Thus, vortex shedding and polar lobe reconnections can be coupled near the magnetospheric polar regions.



軽ガスを用いた無衝突衝撃波の大型レーザー実験

#高橋 佳夏¹⁾, 松清 修一¹⁾, 諫山 翔伍¹⁾, 吉田 光太郎¹⁾, 凡 雨萌¹⁾, 忍田 昂太郎¹⁾, 中山 学¹⁾, 佐藤 弓真¹⁾, 藤山 倫太郎¹⁾, 河野 凌¹⁾, 森田 太智¹⁾, 山崎 了²⁾, 田中 周太²⁾, 竹崎 太智³⁾, 富田 健太郎⁴⁾, 境 健太郎⁵⁾, 蔵満 康浩⁶⁾, 佐野 孝好⁷⁾, 坂和 洋一⁷⁾

(¹⁾ 九大総理工, (²⁾ 青学大理工, (³⁾ 富山大, (⁴⁾ 北海道大, (⁵⁾ 核融合研, (⁶⁾ 阪大・工・電気, (⁷⁾ 阪大レーザー研

High-power laser experiment of collisionless shock generation using light gases

#Kana Takahashi¹⁾, Shuichi Matsukiyo¹⁾, Shogo Isayama¹⁾, Kotaro Yoshida¹⁾, Yumeng Fan¹⁾, Kotaro Oshida¹⁾, Gaku Nakayama¹⁾, Yuma Sato¹⁾, Rintaro Fujiyama¹⁾, Ryo Kono¹⁾, Taichi Morita¹⁾, Ryo Yamazaki²⁾, Shuta Tanaka²⁾, Taichi Takezaki³⁾, Kentaro Tomita⁴⁾, Kentaro Sakai⁵⁾, Yasuhiro Kuramitsu⁶⁾, Takayoshi Sano⁷⁾, Youichi Sakawa⁷⁾

(¹⁾ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, (²⁾ Faculty of Engineering Sciences, Aoyama Gakuin University, (³⁾ Toyama University, (⁴⁾ Hokkaido University, (⁵⁾ National Institute for Fusion Science, (⁶⁾ Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, (⁷⁾ Institute of Laser Engineering, Osaka University

Collisionless shocks in space, which act as energy converters, are considered strong candidates for cosmic ray accelerators. However, the detailed physical mechanisms of acceleration process remain unresolved, and extensive research has been conducted over the years using satellite observations and numerical simulations. To investigate particle acceleration through collisionless shocks, we have conducted high-power laser experiments aimed at reproducing a collisionless shock in the laboratory. In the experiment, a rarefied gas is filled in the chamber, and a solid target is irradiated with the Gekko XII laser (Institute of Laser Engineering, Osaka Univ.). The laser irradiation instantly ionizes the gas and target, creating a plasma. The target plasma compresses the gas plasma, generating a shock wave in the gas plasma. Additionally, by applying an external magnetic field to the test volume using Helmholtz-like coils, the plasma is magnetized.

Considering that particle acceleration through a collisionless shock takes a finite amount of time and that shock waves observed in space are well-developed, it is necessary to drive and measure a shock wave for extended period in experiment. While nitrogen gas was used in our previous experiments, this study employs light gases (hydrogen and helium) to extend the effective measurement time. Since suitable target materials for ionizing light gases have not been determined, silicon nitride, Teflon, and carbon are used for comparison as targets.

In the experiment conducted in 2023, shock wave propagation was confirmed with both hydrogen and helium gases. For hydrogen, it was necessary to increase the gas pressure to 16 Torr to capture a sufficiently clear shock wave structure visible through self-emission measurements. In this case, the Coulomb collision mean free path between ions was smaller than the cyclotron radius at the expected magnetic field strength, making it unsuitable for collisionless shock wave experiments. In contrast, with helium, shock waves could be generated at a gas pressure of 7 Torr, and it was confirmed that the mean free path was larger than the ion cyclotron radius for magnetic field strengths of 1 to 3 T. Therefore, helium was chosen as the optimal gas. Additionally, with helium gas, a precursor structure of the shock wave was observed for all targets, and it was confirmed that this structure originates from the target ions. Among the targets, silicon nitride required more time for the precursor to disappear and for the shock wave front to become clear compared to the other two targets. To capture a clear shock wave front as long as possible within the measurement field, silicon nitride is not suitable. No significant differences were observed between Teflon and carbon, so carbon was selected as the optimal target.

After the shock wave front was formed, periodic fluctuations of the wavefront, similar to the self-reformation characteristic of well-developed shock waves, were observed. In the experiments in 2024, the measurement field will be set farther from the target position compared to the last year, allowing for the measurement of shock wave propagation over a longer period. The presentation will include discussions based on the experimental data in 2024.

宇宙におけるエネルギー変換器としての役割を担う無衝突衝撃波は、宇宙線加速器の有力な候補である。しかし、加速の詳細な物理機構は未解明であり、人工衛星による観測や数値シミュレーションを用いて、長年にわたり研究が続けられている。我々は、無衝突衝撃波による粒子加速を実験室で再現することを目的に大型レーザー実験を行っている。

実験では、チャンバー内に希薄なガスを充填した状態で、固体ターゲットに激光 12 号レーザー (大阪大学レーザー科学研究所) を照射する。レーザー照射により、ガスとターゲットが瞬時にプラズマ化し、ターゲットプラズマがガスプラズマを圧縮することで衝撃波を生成する。また、ヘルムホルツコイルを用いて検査領域に外部磁場を印加することで、プラズマを磁化する。

無衝突衝撃波による粒子加速には有限の時間がかかること、また宇宙で観測される衝撃波は十分に発達した衝撃波であることを考慮すると、実験でも衝撃波を長時間駆動し、計測する必要がある。2022 年度までの実験では、ガスに窒素を使用していたが、本研究では、実効的計測時間を稼ぐため、軽ガス (水素、ヘリウム) を用いた実験を行う。軽ガスの電離に適したターゲット材質が未定なため、ターゲットとして窒化ケイ素、テフロン、炭素を用いて比較検討した。

2023 年度の実験では、水素ガス、ヘリウムガスの両方で衝撃波の伝搬を確認できた。水素では、自発光計測で視認で

きる程度にはっきりした衝撃波構造を捉えるためにはガス圧を 16 Torr まで上げる必要があった。この場合のイオン間のクーロン衝突平均自由行程は、想定している磁場強度でのサイクロトロン半径よりも小さいため、無衝突衝撃波実験には適さない。対してヘリウムでは、ガス圧 7 Torr で衝撃波を生成でき、1.3 T の磁場強度に対して平均自由行程がイオンサイクロトロン半径よりも大きくなることが確認されたため、ヘリウムを最適なガスとした。

またヘリウムガスの場合、全てのターゲットで precursor と呼ばれる衝撃波の前駆構造が確認され、これがターゲットイオン由来であることが分かった。窒化ケイ素は他の 2 つと比較して、precursor が消失して衝撃波面が明確になるまでに時間を要した。計測視野内にできるだけ長く明確な衝撃波面をおさめるためには、窒化ケイ素は適さない。テフロンと炭素では明確な違いはなかったため、炭素を最適なターゲットとした。

衝撃波面が形成された後、十分に発達した衝撃波に特徴的な現象であるリフォーメーションに類似した波面の周期的な変動を観測した。2024 年度の実験では、前年度よりも計測視野をターゲット位置から遠くに設置し、より長時間後の衝撃波面の伝搬を計測できるようにする。発表では、2024 年度の実験データを交えて議論する予定である。

2次元粒子シミュレーションによる協同トムソン散乱の研究

#佐藤 弓真¹⁾, 松清 修一²⁾, 諫山 翔伍³⁾

¹⁾ 九大, 総理工, ²⁾ 九大・総理工, ³⁾ 九大総理工

Study of Collective Thomson Scattering using 2D full Particle-in-cell Simulation

#Yuma Sato¹⁾, Shuichi Matsukiyo²⁾, SHOGO ISAYAMA³⁾

¹⁾kyushu university Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, ²⁾Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, ³⁾Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences

We aim to measure the transition region of collisionless shock waves generated in high-power laser experiments by using collective Thomson scattering (CTS). In general, the transition region of a collisionless shock is in a highly nonequilibrium state. But the theory of CTS in a nonequilibrium plasma is not well developed. Therefore, in this study, we reproduce the CTS in non-equilibrium plasmas by using a full particle-in-cell (PIC) simulation to develop a scattering theory and to compare it with experimental data. Although in the past PIC simulations one-dimensionality and uniformity of space are assumed, the actual experimental system is two-dimensional and the incident light has a finite beam width.

In this study, we reproduce the CTS of incident light with finite beamwidth in a beam-plasma system by using two-dimensional PIC simulations and discuss the characteristics of scattered light propagating in arbitrary directions in the simulation plane. The plasma is composed of background electrons, ions, and beam ions. Initially, the calculations were performed for the case of low background electron temperature ($T_e=T_i$) and relatively high drift velocity of the beam ions ($u_b/v_{te}=4$), where T_i is ion temperature and v_{te} is electron thermal velocity. Then, the Buneman instability between the background electrons and beam ions amplifies the electrostatic field (E_x, E_y) leading to that the electron feature is significantly enhanced and the double peak of its spectrum is asymmetric in contrast to the scattered light spectrum in an equilibrium plasma. Next, we report the results of calculations assuming ion acoustic instability with high background electron temperature ($T_e=100T_i$) and beam ion drift velocity satisfying $v_{ti}<u_b<v_{te}$, where v_{ti} is ion thermal velocity. The speed relationships described above are intended for comparison with experimental data. The results will also be compared with those of the Gekko XII experiment to be conducted in September of this year.

我々は、大型レーザー実験で生成した無衝突衝撃波の遷移層構造を協同トムソン散乱で計測することを目指している。一般に、無衝突衝撃波の遷移層は著しい非平衡状態にあるが、非平衡プラズマによる協同トムソン散乱の理論は未整備である。そこで本研究では、数値シミュレーションによって非平衡プラズマの協同トムソン散乱を再現し、散乱理論の構築と実験データとの比較を目指す。これまでに、空間の1次元性と一様性を仮定した協同トムソン散乱のPIC計算が行われているが、実際の計測システムは2次元系で、入射光は有限のビーム幅を持つ。

本研究では、有限のビーム幅を持つ直線偏波の電磁波を入射したときの協同トムソン散乱を2次元PIC計算で再現し、任意の方向（主に90度散乱）に生成される散乱光の特徴について議論する。背景電子、イオン、およびビームイオンから成るプラズマを考え、初めに、背景電子の温度が低く ($T_e=T_i$)、ビームイオンのドリフト速度が比較的速い ($u_b/v_{te}=4$) 場合の計算を行った。ここで、 T_i はイオン温度、 v_{te} は電子熱速度、 u_b はビームイオンのドリフト速度を表わす。このとき、背景電子-ビームイオン間の Buneman 不安定性により静電波 (E_x, E_y) 成分が増幅され、平衡プラズマ中の散乱光スペクトルと比較して、電子項が著しく増強されて、電子項スペクトルのダブルピークが非対称になることを確認した。次に、背景電子の温度が高く ($T_e=100T_i$)、ビームイオンのドリフト速度が $v_{ti}<u_b<v_{te}$ を満たすイオン音波不安定性を想定した計算結果を報告する。ここに v_{ti} はイオン熱速度である。上述の速度関係は実験データとの比較を念頭に置いている。また、本年度9月に行われる激光XII号実験の結果との比較も行う予定である。

R008-P03

ポスター 2 : 11/25 AM1/AM2 (9:00-12:00)

非相対論的衝撃波における電子の磁気サーフィン加速効率

#大塚 史子¹⁾, 松清 修一¹⁾, 岡 光夫²⁾

⁽¹⁾ 九大・総理工, ⁽²⁾ カリフォルニア大学バークレー校

Electron acceleration efficiency by magnetic surfing at non-relativistic shocks

#Fumiko Otsuka¹⁾, Shuichi Matsukiyo¹⁾, Mitsuo Oka²⁾

⁽¹⁾ Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, ⁽²⁾ University of California Berkeley

To operate the diffusive shock acceleration for electrons, they should be pre-accelerated up to relativistic regime to interact with magnetohydrodynamic (MHD) waves upstream and downstream of the shock. We have proposed magnetic surfing acceleration in a transition region of locally low Mach number quasi-perpendicular shocks. When the locally measured Alfvén Mach number falls below the so-called whistler critical Mach number, dispersive standing whistler waves are excited in the shock transition region. These whistler waves magnetically confine and electrostatically accelerate electrons. In this presentation, we investigate electron acceleration efficiency of magnetic surfing mechanism, by performing several 1D particle-in-cell simulations of shocks with shock angles ranging from 65 to 85 degrees and Alfvén Mach numbers from 3 to 8. Electron energy spectra in the shock transition regions are numerically evaluated, and are fitted by a Kappa distribution. Then, we estimate acceleration efficiency as defined by the power-law index and maximum attained energy of the spectrum, and non-thermal fractions of electron number and energy densities. We also discuss how these factors relate to the whistler critical Mach number. The numerical results will be compared with Geotail observation at the Earth's bow shock (Oka,2006), in which hard power-law energy spectra were found in the super-critical regime.

電子に対し衝撃波統計加速が働くためには、電子は衝撃波上流と下流域に存在する磁気流体波動と相互作用できるエネルギーまで予め加速されておく必要がある。我々は、衝撃波遷移層内でホイッスラー臨界マッハ数を下回るような低マッハ数の準垂直衝撃波において、電子の磁気的なサーフィン加速を提案している。このような状況下では、分散性のホイッスラー波動が定在波として衝撃波遷移層内に存在し、この波動によって電子は磁気的に捕捉され、また同時に静電的に加速される。本発表では、磁気サーフィンによる電子の加速効率を定量的に評価する。衝撃波角 (65~85 度) とマッハ数 (3~8) が異なる複数のパラメータセットに対して全粒子計算を実施する。衝撃波遷移層で得られる電子のエネルギースペクトルをカッパ分布でフィッティングし、加速効率の指標となる物理量 (エネルギースペクトルのベキ指数や最大エネルギー、非熱的電子の数密度やエネルギー密度など) を計算する。これら加速効率の指標がホイッスラー臨界マッハ数とどのように関連しているか議論し、また得られた数値結果を Geotail 衛星観測の統計結果 (岡ら 2006) と比較する。

R008-P04

ポスター 2 : 11/25 AM1/AM2 (9:00-12:00)

#諫山 翔伍^{1,2}, 松清 修一^{1,2}, 佐野 孝好³

⁽¹⁾ 九大総理工, ⁽²⁾ 九大・国際宇宙惑星環境研究センター, ⁽³⁾ 阪大レーザー研

Relativistic Resonant and Wakefield Acceleration Driven by Large Amplitude Alfvén Waves

#SHOGO ISAYAMA^{1,2}, Shuichi Matsukiyo^{1,2}, Takayoshi Sano³

⁽¹⁾Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, ⁽²⁾International Space Center for Space and Environmental Science, Kyushu University, ⁽³⁾Institute of Laser Engineering, Osaka University

Coherent large amplitude MHD waves are ubiquitous in space, and they are considered to play crucial roles in the acceleration of high energy cosmic rays. Chen et al. [1] proposed an idea of Alfvénic wakefield acceleration near a relativistic shock. Chang et al. [2] presented the theory of relativistic magnetowave-induced plasma wakefield acceleration (MPWA) and demonstrated wakefield excitation driven by right-hand polarized Alfvén (whistler mode) waves. However, the generation of relativistic particles by MPWA has not yet been demonstrated.

In 2009, Matsukiyo and Hada [3] showed that a relativistic Alfvén wave in a pair plasma is unstable to form the coherent standing wave form which consists of counter-propagating Alfvén waves. Recent studies [4] have also shown that when the amplitude of the two counter-propagating Alfvén waves exceeds critical amplitude any particles irreversibly gain relativistic energy within a short time regardless of their initial energy.

In this study, we propose a novel acceleration mechanism driven by large-amplitude Alfvén waves, coupled with self-generated counter-propagating waves through decay instability. Once the counter-propagating waves are generated by the decay process, particles are resonantly accelerated perpendicular to the ambient magnetic field by cyclotron resonance. Concurrently, the particles' perpendicular momentum is converted to parallel momentum via the $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ force. These particles are trapped within the propagating wave packets and continuously accelerated to extremely high energies. Additionally, the accumulation of accelerated particles generates large-amplitude wakefields trailing the Alfvén wave packets, which in turn induces wakefield acceleration. We demonstrate that this acceleration mechanism activates when the amplitude of the Alfvén waves surpasses a threshold value. The maximum achievable energy is estimated through an analysis of the particles' phase space trajectories.

[1] P. Chen, T. Tajima, and Y. Takahashi, Phys. Rev. Lett. 89, 161101 (2002).

[2] F. Y. Chang, P. Chen, G-L. Lin, R. Noble and R. Sydora, Phys. Rev. Lett. 102, 111101(2009).

[3] S. Matsukiyo and T. Hada, ApJ. 692, 1004 (2009).

[4] S. Isayama, K. Takahashi, S. Matsukiyo and T. Sano, ApJ. 946 68 (2023).

R008-P05

ポスター 2 : 11/25 AM1/AM2 (9:00-12:00)

#凡雨萌¹⁾, 松清修一¹⁾, 銭谷誠司²⁾

(¹ 九大, (² オーストリア宇宙科学研究所)

Instabilities and microstructures in magnetic island in collisionless magnetic reconnection

#yumeng fan¹⁾, Shuichi Matsukiyo¹⁾, Seiji Zenitani²⁾

(¹Kyushu University, (²Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences)

Collisionless Magnetic reconnection is an important process for abruptly releasing magnetic energy, accompanying with the change of magnetic field topological structure. Through the reconnection, magnetic islands occupied by high energy plasma are often formed. Understanding the physics occurring in magnetic islands is crucial to resolve the mechanisms of energy transfer and particle acceleration through magnetic reconnection.

In a number of the past numerical simulations, microstructures in the magnetic island have been discussed. Lu et al. (2011) conducted two-dimensional PIC simulation in an ion-electron plasma and found regular structures of out-of-plane magnetic field in a magnetic island. In the PIC simulation done by Swisdak et al. (2008), we confirmed similar structures in positron-electron plasma. Inner structures of a magnetic island is also observed in hybrid simulation ($m_i/m_e = \infty$). Walia et al. (2022) showed that the outflow emitted from an X point gives rise to pressure anisotropy of plasma. The pressure anisotropy in a magnetic island can cause regular structures through the excitation of microinstabilities. Lu et al. (2011) demonstrated that the regular structures of out-of-plane magnetic field have a wavevector perpendicular to the current sheet as well as that parallel to it. They explained that the structure having the perpendicular wavevector is due to Weibel instability driven by local electron temperature anisotropy, while the structure having the parallel wavevector is due to nonlinear effects. However, details of the nonlinear effects are not clear. In this study, we discuss the possibility that the coupling between Weibel instability and another electrostatic instability, such as two-stream instability or ion acoustic instability, causes the regular structures.

We conduct 2d PIC simulation (in the x-y plane) of proton-electron plasma, the initial configuration is two Harris current sheets settled in anti-parallel with a background population. We successfully observed similar fluctuations observed by Lu et al. (2011). According to the local distribution function, both electron and proton anisotropies are raised in magnetic island. Based on the estimate of temperature of particles, ion acoustic instability is very likely to exist. We obtain the solution of low frequency electrostatic waves propagating along the outflow direction in the current sheet with finite growth rate by numerical linear analysis. We will show the analytical and numerical solutions of the dispersion relation in the magnetic island.

PINNs を用いた磁気リコネクション構造の再構築

#下岡 暉¹⁾, 松清 修一²⁾, 諫山 翔伍³⁾

¹⁾ 九大総理工, ²⁾ 九大・総理工, ³⁾ 九大総理工

Reconstruction of MHD structures of magnetic reconnection using PINNs

#Hikaru Shimooka¹⁾, Shuichi Matsukiyo²⁾, SHOGO ISAYAMA³⁾

¹⁾ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, ²⁾ Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, ³⁾ Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences

Magnetic reconnection is an important phenomenon through which magnetic energy is converted to plasma kinetic energy. Understanding of its detailed mechanism is crucial for space plasma physics and fusion research. In recent years, the four-satellite MMS mission has revealed the detailed structures of the electron-scale magnetic diffusion region, which is important for understanding driving mechanism of reconnection. Additionally, advanced data analysis methods have enabled to reconstruct the magnetic field and plasma structures apart from satellite positions, while assuming two-dimensionality and temporal stationarity. In the future, multi-point observation using a larger number of satellites are demanded. This would allow for the simultaneous observation of both the MHD-scale structures and the embedded microscale structures, elucidating the role of the magnetic diffusion region in the formation of the overall structure. Furthermore, reconstructing the surrounding structures from multi-satellite data could unveil the three-dimensional structure of reconnection.

Given these prospects, this study explores the reconstruction of magnetic reconnection structures using Physics-informed Neural Networks (PINNs). PINNs leverage physical laws expressed by partial differential equations as loss functions, allowing to learn and predict unknown parameters that satisfy governing equations. By applying this method, we can reconstruct the surrounding structures from satellite data without assuming temporal stationarity. In this study, we simulate magnetic reconnection using MHD simulations and generate virtual satellite data. Subsequently, we use the satellite data and MHD equations for training, predicting the spatiotemporal structures of magnetic field lines, plasma velocity, and density around the observation points. Thus far, we have successfully predicted the spatiotemporal structures of symmetric reconnection using four virtual satellites. We will discuss the reconnection structure and the impact of the configuration and number of satellite formations on prediction accuracy.

磁気リコネクションは、磁力線のつながり変えに伴い磁気エネルギーをプラズマの運動エネルギーに変換する重要な現象であり、そのメカニズムの詳細の解明は、宇宙プラズマ物理学や核融合研究において極めて重要である。近年、4機のMMS衛星編隊による地球磁気圏観測が進み、リコネクションの駆動に重要な電子スケールの磁気拡散領域の詳細な構造が明らかになりつつある。また、観測データの解析手法の進歩により、空間2次元で時間定常という仮定の下で、衛星データから周囲の磁場とプラズマ構造を再構築する試みも進められている。今後は観測点を大幅に増やした、同時マルチスケール観測が望まれる。これにより、MHDスケールの全体と、それに埋め込まれる重要なミクロスケールの部分を多数の衛星で同時に観測し、全体構造の形成における磁気拡散領域の役割を解明することが期待される。さらに複数衛星のデータから周辺の構造を再構築することができれば、リコネクションの3次元構造が明らかとなる。

このような展望を踏まえ、本研究では Physics-informed Neural Networks (PINNs) を用いた磁気リコネクション構造の再構築を試みる。PINNsとは、物理法則に基づいた偏微分方程式を損失関数に用いることで、基礎方程式を満たすように未知パラメータを学習することができる手法である。この手法を応用することで、時間定常の仮定を排除し、衛星データから周辺構造を再構築することが可能となる。実際の衛星データに適用する前の精度検証として、MHDシミュレーションで磁気リコネクションを再現し、仮想衛星観測データを生成する。その後、観測データとMHD方程式を用いて学習し、観測点周辺における磁力線やプラズマの速度、密度などの時空間構造を予測する。これまでに、4つの衛星を使用して対称なリコネクション構造の時空間構造の予測に成功している。発表では、リコネクションの構造と、衛星編隊の配置及び数が予測精度に与える影響について議論する。

R008-P07

ポスター 2 : 11/25 AM1/AM2 (9:00-12:00)

ホイッスラーモード・ヒス放射の非線形波成長のパラメータ依存性

#殷 振興^{1,2)}, 大村 善治²⁾, 謝 怡凱³⁾

(¹ 京都大学海老原研究室, (² 京大・生存圏, (³ 京大生存研

Parametric dependence of nonlinear wave growth of whistler-mode hiss emissions

#ZHENXING YIN^{1,2)}, Yoshiharu Omura²⁾, Yikai Hsieh³⁾

(¹Ebihara laboratory, Kyoto University, (²Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, (³Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Parametric dependence of nonlinear wave growth of whistler-mode hiss emissions

Zhen-Xing Yin, Yi-Kai Hsieh, and Yoshiharu Omura

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

We conduct a series of electromagnetic particle simulations in magnetospheric plasma to analyze the nonlinear wave growth of hiss emissions. In our previous investigation into the effects of the background magnetic field gradient on nonlinear growth of hiss emissions, we confirmed the existence of an optimal gradient that maximizes wave amplitude growth. We also found that in a homogeneous background magnetic field, the wave amplitude is minimized compared to other magnetic field gradient scenarios. Thus, in this study, we focus on the nonlinear growth of hiss in the homogeneous background magnetic field by setting the gradient coefficient to zero and adjusting the initial temperature anisotropy by varying the thermal velocities V_{\perp} and V_{\parallel} . We then calculate wave growth rates in simulations and the theoretical nonlinear wave growth rates for both temperature anisotropy and isotropy cases.

The results show that even in the temperature isotropy case, some wave packets with small amplitudes are generated, and we observe a remarkable growth rate in the wave generation process at the system's boundary. To verify whether the wave amplitude exhibits linear or nonlinear growth, or if it displays nonphysical behavior during the process, we select wave packets with falling-tone and raising-tone characteristics across different wavenumber ranges. We then calculate the frequency variation, trapping period, and the inhomogeneity factor S for each case. In the case of temperature isotropy within a homogeneous setting, we find that, despite the small wave amplitudes, wave packets are still generated, accompanied by frequency variations and inhomogeneity values $|S|$ less than 2. This indicates significant nonlinear effects in some ranges compared to the temperature anisotropy case. Even under the temperature isotropy conditions, the system may still exhibit certain nonlinear effects. These effects can cause the originally linearly stable system to develop wave packets, which may arise due to nonlinear interactions.

References:

- [1] Hikishima, M., Omura, Y., Summers, D. (2020), Particle simulation of the generation of plasmaspheric hiss. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, e2020JA027973,
- [2] Liu, Y., Omura, Y., Hikishima, M. (2021), Simulation study on parametric dependence of whistler - mode hiss generation in the plasmasphere, *Earth, Planets and Space* 73, 230.
- [3] Liu, Y., & Omura, Y. (2022). Nonlinear wave growth of whistler-mode hiss emissions in a uniform magnetic field. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030428.

相対論的電子-イオンプラズマ中のシンクロトロンメーザー不安定性の2次元発展

#馬場 俊輔¹⁾, 松清 修一¹⁾

¹⁾ 九大総理工

Two-dimensional evolution of synchrotron maser instability in relativistic electron-ion plasmas

#Shunsuke Baba¹⁾, Shuichi Matsukiyo¹⁾

¹⁾kyushu University Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences

Synchrotron maser instability (SMI) is one of the energy conversion process from charged particles to electromagnetic fields, and occurs in relativistic shock waves found around high-energy celestial objects such as pulsars. In recent years, it has attracted attention as a physical mechanism that contributes to both high-brilliance radiation and particle acceleration. It has been actively discussed in conjunction with numerical experiments on relativistic shock waves, but there are few examples of calculations in multidimensional periodic systems that focus on the elementary processes of instability. SMI in electron-positron plasmas has already been investigated. In this study, we aim to reproduce SMI in electron-ion plasmas, which are common in space, by using two-dimensional periodic boundary PIC simulations and to understand its basic properties. The mass ratio is 20, the initial particle distribution function is a relativistic ring distribution, and the initial Lorentz factor γ of the ring distribution is 40. Calculations were performed for both cases where the background magnetic field was taken outside the calculation plane (Z direction) and inside the calculation plane (Y direction). The long-term evolution of the wave and the particle acceleration process are discussed. In both cases where the background magnetic field was taken in the Z direction and the Y direction, electron SMI originating from the initial ring energy of electrons and ion SMI originating from the initial ring energy of ions occurred. In the calculations where the background magnetic field was taken in the Z direction, spectrum peaks were observed at a multiple of the cyclotron frequency when the electron SMI was dominant, and it was confirmed that harmonics were excited. These are X-waves, and the results were similar to those of calculations in an electron-positron plasma. It was also confirmed that only the electron ring distribution collapsed, and some electrons were accelerated to a degree that γ exceeded 100. After that, ion SMI became dominant and low-frequency, low-wavenumber waves were excited, and these waves did not decay significantly, and 2% of the initial total ring kinetic energy remained as electromagnetic wave energy. It was confirmed that some electrons continued to accelerate as the ion ring distribution collapsed. In the calculations with the background magnetic field in the Y direction, in addition to X-waves, the excitation of waves propagating diagonally to the background magnetic field, O-wave-like waves, and R and L waves propagating parallel to the background magnetic field were confirmed during the time when the electron SMI was dominant. However, the low-frequency peaks confirmed in the calculation results for the electron-positron plasma were not observed. This wave needs to be investigated further. In addition, during the time when the electron SMI was dominant, no difference was observed in the acceleration of electrons and ions compared to when the background magnetic field direction was taken in the Z direction. During the time when the ion SMI was dominant, the excitation of long-wavelength waves was confirmed in all electromagnetic field components. Large-amplitude waves propagating in the background magnetic field direction were observed in Bx and Bz. The electrons gained speed in the background magnetic field direction as well, resulting in an isotropic velocity distribution. It was also confirmed that some electrons were further accelerated as the ring distribution of ions collapsed.

シンクロトロンメーザー不安定性 (以下 SMI) は荷電粒子から電磁場へのエネルギー変換過程の1つであり、パルサーなどの高エネルギー天体周辺に見られる相対論的衝撃波などで発生する。高輝度放射と粒子加速の両方に寄与する物理機構として近年注目されている。相対論的衝撃波の数値実験に付随して盛んに議論されているが、不安定性の素過程に着目した多次元周期系での計算例は少ない。電子-陽電子プラズマ中の SMI についてはすでに調べられている。本研究では宇宙空間において一般的な電子-イオンプラズマ中の SMI を、2次元周期境界 PIC シミュレーションにより再現し、その基本的性質を理解することを目的とする。質量比を 20、粒子の初期分布関数を相対論的リング分布、リング分布の初期ローレンツ因子 γ を 40 とし、背景磁場を計算面外 (Z 方向) にとった場合と計算面内 (Y 方向) にとった場合のそれぞれについて計算を行った。波動の長時間発展と粒子の加速過程を議論する。背景磁場を Z 方向にとった場合と Y 方向にとった場合どちらも、電子の初期リングエネルギーを起源とする電子 SMI と、イオンの初期リングエネルギーを起源とするイオン SMI が発生した。背景磁場を Z 方向にとった計算では、電子 SMI が支配的な時間に、シンクロトロン周波数の倍数で、スペクトルのピークが見られ、高調波が励起していることが確認できた。これは、X 波であり、電子-陽電子プラズマ中の計算結果と同様の結果が得られた。また、電子のリング分布のみが崩れ、一部の電子は γ が 100 を超えるほど加速されていることが確認できた。その後イオン SMI が支配的となって低周波、低波数の波動が励起され、その波動は大きく減衰することなく、初期の総リング運動エネルギーの 2% が電磁波のエネルギーとして残った。イオンのリング分布が崩れていくとともに、一部の電子も加速し続けることが確認できた。背景磁場を Y 方向にとった計算では、電子 SMI が支配的な時間に、X 波に加えて、背景磁場に対して斜め方向に伝搬する波動や O 波的な波動、さらに背景磁

場に平行方向に伝搬する R 波や L 波の励起が確認された。しかし、電子-陽電子プラズマ中の計算結果で確認できた低周波のピークは見られなかった。この波動について今後調べていく必要がある。また、電子 SMI が支配的な時間では、背景磁場方向を Z 方向にとった場合と、電子とイオンの加速に違いは見られなかった。イオン SMI が支配的な時間では、全電磁場成分で長波長の波動の励起が確認できた。Bx, Bz にはで背景磁場方向に伝搬する大振幅の波動が見られた。電子は、背景磁場方向にも速度を獲得して等方的な速度分布になった。また、イオンのリング分布が崩れていくと同時に、一部の電子がさらに加速していることが確認できた。

R008-P09

ポスター 2 : 11/25 AM1/AM2 (9:00-12:00)

#梅田 隆行¹⁾

⁽¹⁾ 北大基盤センター

Performance evaluation of relativistic particle integrator with conditional branching statements inside a loop for PIC simulations

#Takayuki Umeda¹⁾

⁽¹⁾Information Initiative Center, Hokkaido University

It is known that the theoretical solution to the relativistic E-cross-B motion in a constant electromagnetic field falls into three cases depending on the sign of the squared relativistic Lorentz factor for the E-cross-B drift velocity of charged particles [Friedman & Semon PRE 2005]. Therefore, a new relativistic particle integrator developed by Umeda & Ozaki [EPS 2023] includes branching statements (IF/CASE) inside a loop involving iterations through particles, which depends on the condition of the squared Lorentz factor for the E-cross-B drift velocity. However, it is also known that the computational cost of the conditional branching inside a loop is expensive. In the present study, a performance comparison of several numerical techniques for the conditional branching inside a loop is made.

R008-P10

ポスター 2 : 11/25 AM1/AM2 (9:00-12:00)

電流源を含む高次有限時間差分領域法における数値誤差の改良

#葛心雨^{1,2)}, 関戸晴宇^{1,2)}, 梅田隆行³⁾, 三好由純²⁾

(¹名古屋大学大学院工学研究科, (²名古屋大学宇宙地球環境研究所, (³北海道大学情報基盤センター

Supressing Numerical Errors from Current Desities in Higher-Order Finite-Difference Time-Domain Method

#Xinyu Ge^{1,2)}, Harune Sekido^{1,2)}, Takayuki Umeda³⁾, Yoshizumi Miyoshi²⁾

(¹Graduate School of Engineering, Nagoya University, (²Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, (³Information Initiative Center, Hokkaido University

The objective of the present study is to suppress numerical errors arising from current densities in higher-order FDTD (Finite-Difference Time-Domain) methods. The FDTD method is a numerical approach for solving time-development of electromagnetic fields by approximating Maxwell's equations with finite differences of second-order accuracy in both time and space (Yee 1966), which is referred to as FDTD(2,2). FDTD(2,2) has problems such as numerical oscillations in discontinuous waveforms. Consequently, numerical methods with higher-order finite differences were developed. However, FDTD(2,4) (Fang 1989; Petropoulos 1994) and FDTD(2,6), which uses fourth and sixth-order spatial differences, respectively, have certain issues such that the Courant conditions are more restricted and that numerical errors arise in the time-development equations including current sources. In this study, a higher-order differential term including Laplacian operator is added to FDTD(2,6) (Sekido+2024) to relax the Courant condition and to suppress numerical oscillations. As a result, while the Courant number could be relaxed, the numerical error remained in the high wavenumber range. Furthermore, numerical errors from current densities in FDTD(2,6) are suppressed by introducing correction terms to the time-development equations.

本研究では、FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法において、時間発展式に高次精度差分を用いた際に生じる数値誤差の抑制を行った。FDTD 法は、時間および空間ともに 2 次精度の差分で Maxwell 方程式を近似することで電磁界の時間発展を解く手法であり (Yee 1966)、これを FDTD (2,2) と呼ぶ。FDTD (2,2) では、不連続波形で数値振動が起こる問題があるため、より高次精度の差分を用いた手法が求められていた。4 次精度の空間差分を用いる FDTD(2,4) (Fang 1989; Petropoulos 1994) および更に空間差分精度が高い FDTD(2,6) では、Courant 条件が FDTD(2,2) よりも厳しくなるほか、電流源を含む時間発展式において電荷保存則数値誤差が生じるという問題をかかえている。本研究では、FDTD(2,6) に対し Laplacian 演算子を含む高階微分項を付加することにより (Sekido+2024)、Courant 数の緩和および数値振動の抑制を行った。その結果、Courant 数の緩和ができた一方で、高波数帯における誤差が大きいことを確認した。また、電流密度が生じる数値誤差に対して補正項を追加することで、数値誤差の除去に成功した。

R008-P11

ポスター 2 : 11/25 AM1/AM2 (9:00-12:00)

PINNs(Physics-Informed Neural Networks) を用いたプラズマ-中性流体相互作用に関する数値計算

#河野 凌¹⁾, 松清 修一²⁾, 諫山 翔伍³⁾

⁽¹⁾ 九大総理工, ⁽²⁾ 九大・総理工, ⁽³⁾ 九大総理工

Numerical calculation of plasma-neutral fluid interactions using PINNs(Physics-Informed Neural Networks)

#Ryo Kono¹⁾, Shuichi Matsukiyo²⁾, SHOGO ISAYAMA³⁾

⁽¹⁾Kyushu University Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, ⁽²⁾Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University, ⁽³⁾Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences

Radio-frequency plasma sources utilize high-frequency electrical power in the MHz range to ionize the background neutral gas. Among these sources, the helicon plasma source can generate high-density and low-temperature plasma relatively easily compared to other plasma sources. Therefore, it has been widely used in the fields such as electric thrusters, nuclear fusion plasma, and space plasma simulation experiments. However, helicon plasma has a density limit, and even if the supplied power is increased, the density remains around 10^{19-20}m^{-3} . This is thought to be due to the depletion of neutral particles in the high-density plasma region. Neutral depletion is considered to be the primary factor that determines the density limit of helicon plasma and has a significant effect on the plasma confinement performance in nuclear fusion and the thrust performance of electric thrusters. Therefore, understanding the fundamental processes of plasma-neutral fluid interactions is an important research topic for improving the performance and expanding the applications of helicon plasma sources. To accurately analyze these interactions, two-fluid calculations that solve for electrons and ions separately are required. In high-density regions, the Newton method, which is based on implicit methods, is frequently employed. However, achieving efficient parallelization is challenging, and computational costs remain a significant bottleneck in numerical calculations.

In this study, we aim to accelerate plasma two-fluid calculations using PINNs(Physics-Informed Neural Networks), with the objective of clarifying the interactions between plasma and neutral fluid in high-density plasma regions. PINNs are machine learning methods that incorporate physical laws, and have attracted attention as efficient approaches for solving partial differential equations. By employing automatic differentiation to search for solutions and executing computations with multiple GPU parallel cores, it is expected that the bottleneck of conventional numerical calculation methods will be eliminated, thereby enhancing computational speed. In this presentation, we discuss the calculation model currently under development, with a specific focus on how the evaluation method of the loss function and the setting of boundary conditions affect calculation accuracy.

高周波プラズマ源とは MHz 帯の高周波電力を用いて背景の中性ガスを電離させてプラズマを生成する装置である。その中でもヘリコンプラズマ源は、他のプラズマ源に対し比較的容易に、高密度かつ低温度のプラズマを生成できる。この特性から、電気推進機や核融合プラズマ、宇宙プラズマ模擬実験などの分野で応用されている。しかし、ヘリコンプラズマには密度限界があり、供給電力を増やしても密度は 10^{19-20}m^{-3} にとどまる。これは高密度プラズマ領域で中性粒子が枯渇することが原因と考えられている。中性粒子枯渇はヘリコンプラズマの密度限界を決める主な要因であると考えられているとともに、核融合におけるプラズマ閉じ込め性能、電気推進機の推力性能に多大な影響をもたらす。従って、ヘリコンプラズマ源のさらなる性能向上・応用拡大にはプラズマと中性流体間相互作用の基礎課程を理解することが重要な研究課題となっている。この相互作用を正確に解析するには、電子とイオンを別々に解く 2 流体計算が必要となる。特に高密度領域では、陰解法に基づくニュートン法が多く用いられるが、並列化効率を得にくく、その計算コストが数値計算上のボトルネックとなっている。

本研究では、将来的に高密度プラズマ領域におけるプラズマ-中性流体の相互作用を解明する事を念頭に、PINNs(Physics-Informed Neural Networks) を用いてプラズマ 2 流体計算の高速化を目指す。PINNs は物理法則を取り入れた機械学習手法で、偏微分方程式を効率的に解く方法として注目されている。自動微分を用いた解の探索や、大量の GPU 並列コアを用いた計算を活用することで、従来の数値計算手法のボトルネックを解消し、計算速度の向上が期待される。本発表では、開発中の計算モデルについて、特に損失関数の評価方法や境界条件の設定が計算精度に与える影響について議論する。

R008-P12

ポスター 2 : 11/25 AM1/AM2 (9:00-12:00)

2 流体プラズマモデルへのテンソルネットワーク法応用に向けて

#溝上 雄大¹⁾, 樋口 颯人¹⁾, 吉川 顕正²⁾

(¹⁾ 九大, (²⁾ 九大/理学研究院)

Towards the Application of Tensor Network Methods to Two-Fluid Models

#Yuudai Mizokami¹⁾, Hayato Higuchi¹⁾, Akimasa Yoshikawa²⁾

(¹⁾ Kyushu University, (²⁾ Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University)

This presentation reports on the application of tensor networks to two-fluid plasma, with the development of a multi-fluid simulator aimed at reproducing the magnetosphere-ionosphere coupling system, where weakly ionized and fully ionized plasma regions strongly interact.

The tensor network method was originally developed to efficiently extract essential dynamics from quantum many-body systems with vast degrees of freedom by focusing on the hierarchical structure of information, enabling realistic computational feasibility. However, it has recently gained attention not only in quantum applications but also in the development of methods for efficiently solving fluid turbulence cascades with multiscale interactions (Gourianov et al., 2022) and kinetic plasmas (Ye et al., 2022).

These applications utilize tensor networks based on the widely used multigrid method in numerical calculation. This approach efficiently handles phenomena at various scales and applies appropriate mathematical processing to the information exchanged between scales, leading to computational acceleration.

In this study, we focus on applying tensor networks as a tool for efficiently managing the multiscale nature of waves arising from multi-fluid plasma dynamics. This presentation will discuss the research background, explain the tensor network method employed, and review previous studies (Ye et al., 2022) and future prospects.

弱電離プラズマ領域と完全電離プラズマ領域が強く相互作用する磁気圏電離圏結合系の再現に向けた多流体シミュレータの開発を念頭に、テンソルネットワークによる2流体プラズマへのアプローチについて報告する。

テンソルネットワーク法は、元々膨大な自由度を持つ量子多体系の振る舞いを、現実的な計算量で扱うために、情報の階層性に着目し、本質的なダイナミクスを効率的に抽出する手法として開発されてきた。しかし、近年量子分野の応用へ留まらず、マルチスケール性を備えた流体の乱流カスケード (Gourianov et al., 2022) や運動論プラズマを効率的に解く手法 (Ye et al., 2022) が開発され、注目されている。

これらの応用では数値計算で広く用いられているマルチグリッド法をベースにテンソルネットワークを展開することで、それぞれのスケールでの現象を効率的に処理し、かつそのスケール間を繋ぐ情報量に適切な数学的処理を施すことで、高速化を可能にしている。

そこで本研究では多流体プラズマのダイナミクスに起因する波動のマルチスケール性を効率的に処理できるツールとしてテンソルネットワークの応用に焦点を当てた。

本発表では、研究背景、今回手法として用いるテンソルネットワーク法の解説を行い、先行研究 (Ye et al., 2022)、展望について議論する予定である。

ARTEMIS 衛星で観測されるダスト衝突に起因する電位変動

#宝本 航大¹⁾, 栗田 怜²⁾, 小嶋 浩嗣³⁾

¹⁾ 京都大学大学院, ²⁾ 京都大学 生存研, ³⁾ 京大

Detection of dust impact-like signals by electric field instrument onboard the ARTEMIS satellites

#Kota Takaramoto¹⁾, Satoshi Kurita²⁾, Hirotsugu Kojima³⁾

¹⁾ Graduate School of Engineering, Kyoto University, ²⁾ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ³⁾ Kyoto university

Nanometer-sized dust particles are present in space, and previous observations have shown that these dust particles collide with spacecraft at high velocities (>1 km/s), generating plasma clouds around spacecraft. It is known that the plasma cloud generated by the dust impact can affect the interpretation of electric field observations by satellites since the signature of this dust impact appears as the electric field pulse signals. These signals are detected in many satellite missions such as Voyager, Cassini, Wind, STÉREO, and MMS. In this study, we analyzed data obtained from the electric field instruments on the ARTEMIS satellites to identify dust impact-like signals along the ARTEMIS orbit around the Moon. When dust particles collide with the spacecraft body, all electric field probes on the spacecraft simultaneously measure pulse signals with identical characteristics. The Electric Field Instrument (EFI) onboard the ARTEMIS satellites is suitable to detect these signals since individual sensor potentials from six electric probes are available during the high-time resolution waveform acquisition for ~8 seconds, which are obtained 3-5 times per day. By exploiting the fact that, in the case of probe signals by the dust impact, the sum of the pulse signals from paired probes is enhanced while the difference is nearly zero. We conducted a detailed analysis of dust events. Additionally, we verified the events by confirming that the phase differences between signals from the probes were nearly zero. As a result, we categorized the dust impact events into two main types based on the intensity and characteristics of the observed pulse signals. Further detailed analysis of the arrival direction and magnitude of the signals in the group of events with particularly strong intensities suggests that the dust may be of interstellar origin, likely colliding with the spacecraft itself. In the other group, strong signals were observed only on specific probes, suggesting the possibility of events where dust collided with the probes themselves rather than with the spacecraft body.

ナノメートルサイズのダスト粒子は宇宙空間に存在し、これまでの観測からこれらの粒子が高速 (>1 km/s) で衛星と衝突する際に衛星周囲にプラズマ雲が生成されることが確認されている。ダスト衝突によって発生するプラズマ雲は衛星による電場観測の解釈に影響を与える可能性があり、この衝突の痕跡がパルス信号として現れることが知られている。これらの信号は、ボイジャー、カッシーニ、ウィンド、STÉREO、MMS など多くの衛星ミッションで観測されている。本研究では ARTEMIS 衛星に搭載された電場計測器から得られたデータを解析し、月周回軌道におけるダスト衝突と考えられる信号を特定した。ダスト粒子が衛星本体に衝突した際には衛星上のすべてのプローブで同じ特徴を持つパルス信号を同時に検出する。ARTEMIS 衛星に搭載された電場計測器 (EFI) は、6 つの電場プローブから個別のセンサーポテンシャルが得られるため、これらの信号の検出に適している。高時間分解能の波形データは 1 日に 3~5 回、約 8 秒間取得される。本研究ではダスト衝突による信号に対して、対となるプローブのパルス信号の和は強め合い差がほぼゼロになるという特性を利用して詳細な解析を行った。また、プローブ間の信号の位相差がほぼゼロであることを確認しイベントの信頼性を検証した。その結果、観測されたパルス信号の強度と特徴に基づき、ダスト衝突イベントを 2 つの主要なタイプに分類した。特に強度の高いイベントグループにおいて、信号の到来方向と強度の詳細な解析からこれらのダストが衛星自体に衝突した可能性が高く星間塵由来であることが示唆された。もう一方のグループでは特定のプローブでのみ強い信号が観測されたため、衛星本体ではなくプローブ自体にダストが衝突した可能性が考えられる。

R008-P14

ポスター 2 : 11/25 AM1/AM2 (9:00-12:00)

帯電・分極した固体天体レゴリスの動力学シミュレーションに向けた数値技術開発

#三宅 洋平¹⁾, 高橋 昇大¹⁾, 榊原 大和¹⁾, 中園 仁¹⁾

¹⁾ 神戸大学大学院システム情報学研究科

Development of a Dynamical Simulator for Charged Regolith Particles on Airless Planetary Bodies

#Yohei Miyake¹⁾, Shota Takahashi¹⁾, Yamato Sakakibara¹⁾, Jin Nakazono¹⁾

¹⁾ Graduate School of System Informatics, Kobe University

The regolith layers of airless planetary bodies are constantly exposed to space plasma particles. The surface charging processes can be regarded as the accumulation of electrostatic energy on the surface of solid planetary bodies, but it is still unclear how it can contribute to the regolith dynamics and surface evolution on the planetary bodies. We have recently proposed the mechanism of anomalously strong surface charging, which can be developed within depressions of uneven regolith layers and in the voids between regolith particles, based on the results obtained by PIC-based surface charging simulations. The localized electric field formed by the inhomogeneous charge distribution on the uneven surface may give rise to the rearrangement of pile-up structures and granular flow phenomena of regolith particles, releasing stored electrostatic energy in the process. In order to clarify the dynamics of charged/polarized regolith particles, we have started the development of a numerical simulator for particulate dynamics based on the discrete element method (DEM). In this presentation, we discuss our target physical processes and report the development status of the simulator.

大気を持たない固体天体のレゴリス表層は、宇宙から飛来するプラズマ荷電粒子に常時曝されている。プラズマによる表面帯電現象は天体表面における静電エネルギー蓄積に他ならないが、それが固体天体上のレゴリス力学特性や表層進化に如何なる寄与を与えうるかは未だ以て不明である。近年、筆者らは PIC 手法に基づく月面帯電シミュレーションにより、レゴリス層の起伏やレゴリス粒子間の空隙に強力な帯電が成立することを見出した。凹凸部の不均一な電荷分布によって形成される局所性電場はレゴリスの堆積構造変化や流動現象を誘発し、その過程で貯蔵された静電エネルギーを解放する可能性がある。このように帯電・分極したレゴリス粒子の挙動を明らかにするため、個別要素法に基づく粉粒体数値シミュレータの開発を開始した。本発表では、その狙いと開発状況を報告する。