

2023年度 07) 計算機利用共同研究 目次詳細

2 件

*所属・職名は2024年3月現在

*Affiliation and Department displayed are current as of March 2024.

研究代表者 Principal Investigator	所属機関* Affiliation	所属部局 Department	職名* Job title	研究課題名 Project Title	頁 Page	備考 Remarks
梅田隆行	名古屋大学	宇宙地球環境研究所	准教授	プラズマ粒子シミュレーションコードの並列化と性能チューニング	278	
齊藤慎司	NICT	宇宙環境研究室	主任研究員	プラズマ波動による放射線帯電子の散乱に関するシミュレーション研究	280	

(別紙様式07-2)

プラズマ粒子シミュレーションコードの並列化と性能チューニング
Parallelization and performance tuning of
particle-in-cell code for plasma simulations

梅田隆行、名古屋大学・宇宙地球環境研究所

研究目的

宇宙プラズマ現象はマルチスケール・マルチ物理過程であるが、従来の研究では、時間および空間スケールの異なる現象に対して、それらに適した流体コード、ハイブリッドコード、運動論コードを個々に適用させていた。しかし、プラズマ流体・イオン・電子やマクロ・メソ・マイクロなどの異なる時空間スケールの現象が互いに未知の物理過程で結合している宇宙プラズマにおいては、第一原理によりこれらを理解することが重要である。本研究では、第一原理運動論シミュレーション手法である粒子コードに再注目し、その並列化および性能チューニングを行う。

研究方法

プラズマ電磁粒子(PIC: Particle-In-Cell)コードの電磁場更新、電流密度更新および速度更新のそれぞれのカーネル部分の手法について再検討し、高(次)精度化および高速化を目指す。

研究結果

動的負荷バランスを導入した並列版 PIC コードを用いて、レーザー生成衝撃波の数値実験及び、オーロラ加速領域ダブルレイヤーのシミュレーションを行った。また本年度は特に、以下の2点について新たな数値手法を開発した。

電磁場の時間発展を解く FDTD 法について、クーラン条件を緩和しつつ、空間差分を高次(4次および6次)精度化することに成功した。また、従来の Boris 法では扱えなかった相対論的荷電粒子の運動について、ローレンツ因子が大きいドリフト運動について理論解に基づいた新たな4次精度数値積分法を開発した。

成果発表

論文

- Umeda, T., and R. Ozaki, Advanced numerical techniques for time integration of relativistic equations of motion for charged particles, *Earth, Planets and Space*, Vol.75, 157(12pp.), 2023.
<https://doi.org/10.1186/s40623-023-01902-8>
- Sekido, H., and T. Umeda, A novel high accuracy finite-difference time-domain method, *Earth, Planets and Space*, Vol. 76, 5(20pp.), 2024. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01934-0>
- Sekido, H., and T. Umeda, Relaxation of the Courant condition in the explicit finite-difference time-domain (2,6) method with third- and fifth-degree differential terms, *Progress in Electromagnetics Research M*, in press.
- Umeda, T., Generation of normal distributions revisited, *Computational Statistics*, in press.

学会発表

- 関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純, ラプラシアン演算子を用いた陽的FDTD法の分散関係の異方性の低減, *Japan Geoscience Union Meeting 2023*, 幕張メッセ (ハイブリッド), 2023年5月23日.
- 尾崎 理玖, 梅田 隆行, 三好 由純, 相対論的運動方程式の高次精度数値解析手法の研究, *Japan Geoscience Union Meeting 2023*, 幕張メッセ (ハイブリッド), 2023年5月22日.

- 梅田 隆行, 池羽 良太, Formation of double layer in two-dimensional current carrying plasma, Japan Geoscience Union Meeting 2023, 幕張メッセ (ハイブリッド), 2023年5月22日.
- Sekido, H., T. Umeda, and Y. Miyoshi, Improvement of the explicit finite-difference time-domain method with higher-degree differential terms, 34th IUPAP Conference on Computational Physics, 神戸コンベンションセンター, 2023年8月7日.
- Umeda, T., and R. Ozaki, Advanced numerical techniques for time integration of relativistic equations of motion for charged particles, 34th IUPAP Conference on Computational Physics, 神戸コンベンションセンター, 2023年8月8日.
- Ozaki, R., and T. Umeda, Higher order integrators for relativistic equations of motion for charged particles, 35th General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, 札幌コンベンションセンター, 2023年8月20日.
- Sekido, H., and T. Umeda, Reduction of anisotropy in numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method with Laplacian, 35th General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, 札幌コンベンションセンター, 2023年8月25日.
- Umeda, T., and R. Ikeba, Formation of double layer in two-dimensional current carrying plasma, 35th General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, 札幌コンベンションセンター, 2023年8月25日.
- 関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純, 電流源を含む陽的高次FDTD法における数値誤差の修正, 第154回地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS) 総会・講演会, 東北大学, 2023年9月25日.
- 梅田 隆行, 尾崎 理玖, A new integrator for relativistic equations of motion for charged particles, 第154回地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS) 総会・講演会, 東北大学, 2023年9月25日.
- 尾崎 理玖, 梅田 隆行, 三好 由純, 池羽 良太, 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, 第154回地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS) 総会・講演会, 東北大学, 2023年9月24日.
- Sekido, H., T. Umeda, and Y. Miyoshi, Reduction of anisotropy in numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, ポートメッセなごや, 2023年11月13日.
- Umeda, T., H. Sekido, and R. Ozaki, Recent advances in numerical schemes for plasma particle-in-cell simulations, 7th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, ポートメッセなごや, 2023年11月15日.

プラズマ波動による放射線帯電子の散乱に関するシミュレーション研究
Simulation study for scattering of radiation belt electrons by waves in plasmas

齊藤慎司、国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所電磁波伝搬研究センター宇宙環境研究室

【研究目的】

地球磁気圏に捕捉された放射線帯電子フラックスは、CMEやCIRによる磁気嵐の影響で大きく変動することが知られている。フラックス変動を起こす要因の1つとして注目されているのが、磁気圏中に励起される波動と放射線帯電子の間で起こる「波動粒子相互作用」である。特に電子とサイクロトロン共鳴が可能なwhistler mode波動による散乱過程が、放射線帯電子のフラックス変動に重要な役割を担っていると考えられている。whistler mode波動によるフラックス変動には、電子の加速に伴う増加と大気への降り込みに伴う消失が大きな役割を担っていると考えられている。

whistler mode波動による放射線帯電子の大気への降り込み過程は、脈動オーロラを明滅させる間欠的な現象を説明すると考えられている^{e.g.1}。準線形的な考察のもとでは、波動振幅が大きくなるとロスコーンを埋めるまで降り込み量が多くなると考えられる。しかしながら、北原ら²による研究では、波動振幅が大きくなるとロスコーン付近の電子がピッチ角を大きくする傾向を持つことで、降り込み量を減らすような振る舞いがあることを示している。これはwhistler mode波動の非線形的な散乱過程が原因であると結論付けられている。

本研究では、whistler mode波動による放射線帯電子の大気降り込みについて、どのような非線形散乱過程が重要な役割を担っているのかについて検証を行った。放射線帯電子降り込みの波動振幅依存性を調べ、位相捕捉³を伴う散乱過程に降り込みを抑制する効果があることがわかった。

【研究方法】

本研究では、GEMISISプロジェクトのもとで開発された1次元テスト粒子モデルであるGEMISIS-RBW⁴を用いた。L=6.1における地球ダイポール磁場の磁力線に着目し、この磁力線を1秒間に3回励起されるLower-band-chorus (LBC)波動が並行方向に伝搬するモデルを考える。周波数幅は $0.2f_{ce}-0.4f_{ce}$ までとし、LBC波動のエレメントの時間長さは200msとした。背景のプラズマ密度は $9/cc$ とし、磁力線方向に一様であると仮定している。放射線帯電子の消失高度を地上から100kmとしており、ロスコーン角は約3度となっている。赤道面上での初期のフラックス分布は、

$$j(E, \alpha_{eq}) = 10^7 \sin \alpha_{eq} \exp \frac{E}{E_0} \text{ [/cm}^2\text{/str/keV/s]}$$

として定義している。ここで E_0 は200keVとしている。LBC波動の振幅を変えた場合に放射線帯電子の降り込みがどのように変化するか注目して非線形散乱過程について検証をおこなった。ここで、本シミュレーションは統合データサイエンスセンター計算機システム (CIDASシステム) において実行されている。

【研究結果】

図1はLBC波動によって散乱されて降り込んできた電子の散乱前のエネルギーとピッチ角の分布を示している。左図が磁場振幅30pT、右図が300pTのLBC波動で散乱された結果となる。灰色でハッチされている部分がロスコーン領域となっている。黒の点線は準線形理論で期待される降り込み電子のピッチ角範囲

を示しており、これより小さいピッチ角の電子が優位に降り込んでくると予想される。波動振幅が小さい場合は、準線形で期待される電子が優位に降り込んできている一方で、波動振幅が大きい場合は、準線形で期待されるピッチ角範囲からの降り込みフラックス量が減少するという結果が得られた。

【考察とまとめ】

本研究ではGEMSIS-RBWモデルを用いて、LB C波動による散乱によって降り込む放射線帯

電子の振幅依存性について調べた。LBC波動との散乱によってロスコーン付近の数keVから数十keVの電子が降り込んできており、低エネルギーの電子ほどより大きなピッチ角から散乱されてきていることがわかった。これは、準線形理論で期待される傾向と一致するが、低エネルギーほどより大きなピッチ角からロスコーン内へ輸送されてくることが示されている。また、波動振幅が小さい場合 ($\delta B = 30\text{pT}$) は、ロスコーン付近の電子が多く降り込む傾向にあるが、振幅が大きい場合 ($\delta B = 300\text{pT}$) は、ロスコーン付近の電子の降り込む割合が減少し、大きいピッチ角を持つ電子が降り込む割合が大きくなる傾向が示された。これは準線形的な散乱の振る舞いとは異なり、ピッチ角と波動振幅に依存する非線形的振る舞いであると考えられる。波動振幅が大きい場合において、エネルギー10keV以下、ピッチ角10度付近での非線形散乱指標 (ρ_V)⁵を調べてみると、位相捕捉が起きやすい条件であることがわかった。このことより、LBC波動による放射線帯電子の降り込みは、ロスコーン付近の準線形的な振る舞いによる散乱だけではなく、非線形的な散乱過程も関連していることが考えられる。特に位相捕捉に関しては、降り込み量を減少させる傾向を持ち、北原ら²の結果との整合性と差異について今後議論が必要と考える。

【引用文献】

1. Miyoshi, Y., S. Saito, K. Seki, T. Nishiyama, R. Kataoka, K. Asamura, Y. Katoh, Y. Ebihara, T. Sakanoi, M. Hirahara, et al. (2015), Relation between fine structure of energy spectra for pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistler mode chorus waves, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 7728-7736, doi:10.1002/2015JA021562.
2. Kitahara, M., & Katoh, Y. (2019). Anomalous trapping of low pitch angle electrons by coherent whistler mode waves. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 5568-5583. <https://doi.org/10.1029/2020JA026493>
3. Omura, Y., N. Furuya, and D. Summers (2007), Relativistic turning acceleration of resonant electrons by coherent whistler mode waves in a dipole magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 112, A06236, doi:10.1029/2006JA012243
4. Saito, S., Y. Miyoshi, and K. Seki (2012), Relativistic electron microbursts associated with whistler chorus rising tone elements: GEMSIS-RBW simulations, *J. Geophys. Res.*, 117, A10206, doi:10.1029/2012JA018020.
5. Saito, S., Y. Miyoshi, and K. Seki (2016), Rapid increase in relativistic electron flux controlled by nonlinear phase trapping of whistler chorus elements, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 6573-6589, doi:10.1002/2016JA022696.

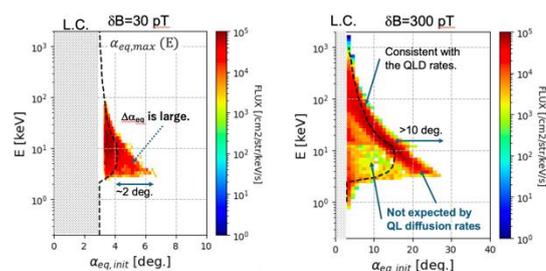


図 1: ロスコーンへ到達した電子の初期のエネルギーとピッチ角の分布。左図が磁場擾動の振幅が 30pT、右図が 300pT の結果を示す。