

2022年度 07) 計算機利用共同研究 目次詳細

3 件

*所属・職名は2023年3月現在

*Affiliation and Department displayed are current as of March 2023.

(注1): 新型コロナウイルスの影響で中止 / Cancelled due to COVID-19

(注2): 中止 / Cancelled

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
田中 高史	九州大学	国際宇宙天気科学・教育センター	学術研究者・名誉教授	アークオーロラの統一理論	288	
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	290	
齊藤 慎司	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	292	

(別紙様式 7-2)

計算機利用共同研究報告 (2022年度)

和文課題名 アークオーロラの統一理論
英文課題名 theory of the arc auroras

田中高史、九州大学・国際宇宙天気科学・教育センター・名誉教授

計算機利用共同研究報告

オーロラはアークとディフューズに分類されることは古来より知られている。サブストームに關与する quiet arc とオンセットアーク、北向き IMF で觀察される、sun-aligned arc、fan arc、テーターオーロラは、全てアークである。アークはそれぞれの発生条件も、明るさにも大きな幅があるが、それなのになぜ同じアークなのか。

オンセットが Quiet arc の赤道側から始まることは、サブストーム研究の初期から謎とされてきた。Quiet arc とオンセットの關係は、SuperDARN でも研究されている。オンセット点は quiet arc の分布と密接に關係することや、quiet arc にはシアーが伴うことなどが分かっている。また衛星觀測では、多重 quiet arc に対する粒子降下の様相などが觀測されている。これらをよく見て、その結果の合わせる必要があるであろう。しかし一般には、サブストームでは磁気圏觀測衛星による研究とそれを運用する機關が主役であり、それ以外の存在は取るに足らないおまけであり、考慮する価値はないと思われているようである。

計算手法 (Computational Aspects):

REPPU コードは、ハイブリッド並列化した、高精度 M-I 結合系 MHD シミュレーションである。球面格子は 1 2 面体分割 3 角格子であり、始めの分割でできたもの (6 0 三角) をレベル 1、その後 1 つの 3 角形を 4 つに分割したものをレベル 2 というふうに呼んでいる。3 次元格子は球を半径方向に重ね合わせる。ただし球の中心を順次ずらし、内側は球座標、反太陽方向の外側は円柱座標に漸近させる。

研究成果 (Accomplishments) :

サブストームに關与する quiet arc とオンセットアーク、北向き IMF で觀察される、sun-aligned arc、fan arc、テーターオーロラは、全てアークである。アークはそれぞれの発生条件も、明るさにも大きな幅があるが、それなのになぜ同じアークなのか。その理由は、アークは上向き FAC の可視化ということである。今年度には、FAC とは磁気圏から電離圏への対流の伝達であり、アークの違いは、伝達する対流のトポロジーの違いの反映である、との結果を得た。

アークは上向き FAC の可視化であることは、当たり前であろうか。一般に流通している論文を読んだ感想として、たいていはアークは粒子落下、粒子加速であるという通念にこだわり、すぐには FAC とは理解しないであろうと予想していた。しかし、JGR のレビューワーの一人は、当たり前であると断言した。世界（米国）も一枚岩ではなく、多種の人種が混在しており、中には達人もいると感じた。世界から日本に伝来する際に、多数意見が平凡性のフィルターを通し、主流として再流通する仕組みがあるのかもしれない。

サブストームオンセットを特別扱いし、これぞ MHD の破れであると主張するのは、古来よりの常道である。オンセットアークは確かに異常である。これだと、CW、粒子効果など、自然に湧き出てくる。オーロラは粒子落下であり、粒子加速の結果となるのは自然である。このような既存路線ができると、それに逆行するのは極めて難しいようである。複合系では決定的な証明は難しいという困難は、この場合も当てはまる。これらに対し、グローバルシミュレーションの解では、サブストームは MHD であり、トポロジーと対流の変動である。これにより HD (Harang discontinuity) の成長と崩壊も自然に理解できる。

(論文)

- [1]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, S. Fujita, N. Nishitani, and R. Kataoka (2022). Interpretation of the theta aurora based on the null-separator structure, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, 2022JA030332.
- [2]Tanaka, T., Y. Ebihara, M. Watanabe, S. Fujita, N. Nishitani, and R. Kataoka (2022). Unified theory of the arc auroras: formation mechanism of the arc auroras conforming general principles of convection and FAC generation, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, 2022JA030403.

(別紙様式 7 - 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・ミ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3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数値積分法を開発した。さらに、電流密度更新においてマルチカラーオーダーリングに基づくループのタイル化を行うことによってリダクション演算を回避し、メニーコアプロセッサにおいて高いスケーラビリティを実現した。

成果発表

論文

- Umeda, T., Multicolor reordering for computing moments in particle-in-cell plasma simulations, Computer Physics Communications, Vol.281, 108499 (6pp.), 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2022.108499>
- Umeda, T., A new integrator for relativistic E-cross-B motion of charged particles, Journal of Computational Physics, Vol.472, 1111694 (17pp.), 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111694>
- Sekido, H., and T. Umeda, Relaxation of the Courant condition in the explicit finite-difference time-domain method with higher-degree differential terms, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.71, No.2, pp.1630-1639, 2023. <https://doi.org/10.1109/TAP.2023.3234097>

学会発表

- 梅田 隆行, Performance measurement and tuning of plasma kinetic simulation codes on recent scalar CPUs, Japan Geoscience Union Meeting 2022, 幕張メッセ (ハイブリッド), 2022年5月30日.
- 池羽 良太, 梅田 隆行, 三好 由純, Computer simulation on the structure of double layer in the auroral

acceleration region, Japan Geoscience Union Meeting 2022, 幕張メッセ (ハイブリッド), 2022年5月30日.

- 関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純, Reduction of numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method with higher-order differential terms, Japan Geoscience Union Meeting 2022, 幕張メッセ, 2022年5月22日.
- Sekido, H., T. Umeda, and Y. Miyoshi, Reduction of numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method with higher-order differential terms, 2022 URSI-Japan Radio Science Meeting, Tokyo, Japan, September 1, 2022.
- Sekido, H., T. Umeda, and Y. Miyoshi, Reduction of numerical dispersion in the explicit finite-difference time-domain method with higher-order differential terms, The 14th International School for Space Simulations, Online, September 14, 2022.
- Ikeba, R., T. Umeda, and Y. Miyoshi, Computer simulation on the structure of double layer in the auroral acceleration region, The 14th International School for Space Simulations, Online, September 14, 2022.
- 梅田 隆行, Multicolor reordering for computing moments in particle-in-cell plasma simulations, 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会, 相模原産業会館, 2022年11月6日.
- 池羽 良太, 梅田 隆行, 三好 由純, オーロラ加速領域における電界構造の計算機シミュレーション, 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会, 相模原産業会館, 2022年11月6日.
- 関戸 晴宇, 梅田 隆行, 三好 由純, 高階微分項を用いた陽的FDTD法のクーラン条件の緩和, 第152回地球電磁気・地球惑星圏学会の総会および講演会, 相模原産業会館, 2022年11月6日.
- 梅田 隆行, マルチカラー法によるプラズマ粒子コードのスレッド並列化, 第187回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, 沖縄産業振興センター, 2022年12月2日.
- 梅田 隆行, ループ分割によるA64FXにおけるプラズマ粒子コードの性能チューニング, 第188回ハイパフォーマンスコンピューティング研究発表会, 北海道大学, 2023年3月16日.

(別紙様式07-2)

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、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。本研究では、テスト粒子シミュレーションを用いて、whistler mode 波動による非線形散乱過程が、放射線帯全体に及ぼす影響について研究を行う。

栗田らによる観測的な研究¹⁾により、upper-band whistler mode chorus (LBC)が 24 keV – 25 keV の放射線帯電子を生成し、電子フラックスを短時間で増加させている現場が捉えられた。さらにここで観測された電子加速は数十 ms 以下の高速な変動を持つことが SV Step (時間分解能 15ms) による詳細な解析により明らかになってきている。この観測によると、24 keV – 25 keV において、1 秒程度の平均的なフラックス変化は比較的緩やかに増加しているように見える一方で、数十 ms 程度の時間分解能で観測すると、大きなフラックス変動が含まれていることがわかってきた。これは時間分解能を上げたことによる SN の低下では説明が出来ないことがわかっており、UBC による加速が高速なフラックス変動の原因になっていることを示唆している。本研究ではこの観測をシミュレーションによって再現することによって、UBC によってどのような電子散乱が起きているのかを調べる。

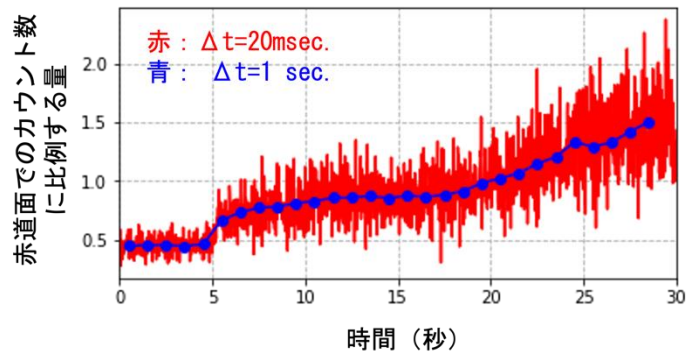
【研究方法】

GEMSIS 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 GEMSIS-RBW²⁾を用いて、UBC によって放射線帯電子がどのような散乱を受けるのかを調べる。あらせ衛星によって観測された UBC を含んだ周波数スペクトルの時系列変化を入力として与え、この周波数と波動強度を持った whistler mode 波動を赤道面から伝搬させる。背景の磁場強度およびプラズマ密度はあらせ衛星による観測値から見積もられている。ここで磁力線方向の磁場強度は、赤道面磁場強度を 170nT とした地球ダイポール磁場を仮定している。このような背景の中を伝搬する whistler mode 波動によって散乱された電子がどのように加速されるのかを多数のテスト粒子を用いて調べる。本計算はこれまで宇宙地球環境研究所に設置されているクラスター計算機 (GCL) によって計算がされてきたが、現在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) へ移行を完了し観測実証のための数値実験を開始している。

【結果】

図1の赤線は、GEMSIS-RBW によって計算された、赤道面における 24 keV – 25 keV のエネルギーを持つ電子のカウント数に比例する量の時系列変化を示している。ここで時間分解能は 20ms としている。また、青線は、赤線で示されている値を1秒間で平均した量を示している。この図を見ると、約5秒後から1秒平均値が増えているのがわかる。この時間は UBC バーストが赤道付近から伝搬し始めて

いる時間に相当しており (Kurita+2018 参照¹⁾)、UBC による電子加速により高エネルギー電子数が増加していることを示している (Saito+2021 参照³⁾)。赤線で示される時系列変化を見ると、この増加に伴い平均値からの振れ幅がカウント数の増加に伴い広がっているのが確認出来る。この結果は 2022 年の SGEPPSS 秋学会で示された栗田らの解析結果と同じ傾向を示しており、観測時と同じような電子散乱機構が再現されていることを示唆している。



また、カウント数の時間的なばらつきをポアソン分布のばらつきと比較すると、カウント数が大きくなるほどポアソン分布よりも広い分布となる傾向があることがわかった。現在このばらつきの変化がなぜ起きているのかをより詳細なデータ解析を行うことによって明らかにしようとしている。また今後、テスト粒子数を増やすことでこの傾向に何らかの変化が現れるのかを検証する必要があるため、次年度以降はテスト粒子数を増やした計算を実施する予定である。

【まとめ】

本研究ではあらせ観測によって観測された UBC による電子の加速機構について、GEMSIS-RBW によるシミュレーションを用いて数値的な実証実験を行なっている。あらせ観測において UBC による電子加速が起きる際に非常に短い時間変化が含まれることが発見されており、数値実験においても同様な傾向が見られることを確認した。今後、より詳細なデータ解析を多数のテスト粒子を用いることで実施し、どのようにして高速なカウント数の変調が現れるのかについて、非線形加速プロセスの寄与を視野に入れ、この電子加速機構を明らかにする。

【引用文献】

1. Kurita, S., Miyoshi, Y., Kasahara, S., Yokota, S., Kasahara, Y., Matsuda, S., et al. (2018). Deformation of Electron Pitch Angle Distributions Caused by Upper Band Chorus Observed by the Arase Satellite. *Geophysical Research Letters*, 45(16), 7996–8004. <https://doi.org/10.1029/2018GL079104>
2. Saito, S., Miyoshi, Y., & Seki, K. (2012). Relativistic electron microbursts associated with whistler chorus rising tone elements: GEMSIS-RBW simulations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (1978–2012), 117(A10), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2012JA018020>
3. Saito, S., Kurita, S., Miyoshi, Y., Kasahara, S., Yokota, S., Keika, K., et al. (2021). Data-Driven Simulation of Rapid Flux Enhancement of Energetic Electrons With an Upper-Band Whistler Burst. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(4). <https://doi.org/10.1029/2020ja028979>

【成果発表】

1. S. Saito, S. Kurita, Y. Miyoshi, Y. Katoh, and S. Matsuda, High temporal variation in the electron fluxes during the flux burst event: Test-particle simulation, SGEPPSS 2022 Fall Meeting, Sagami-hara, Kanagawa, Japan, 7th Nov. 2022.