

惑星電磁圏におけるプラズマ粒子加速・加熱過程の計算機実験

加藤雄人¹、寺田直樹¹、八木学¹

田所裕康²、黒田剛史¹、寺田香織¹

1:東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻 2:東京工科大学

概要

本研究グループは、惑星電磁圏において様々な時間・空間スケールで生じるプラズマ粒子加速・加熱過程の定量的理解を目的として、大規模計算機実験を用いた研究を進めている。特に本課題では、地球磁気圏・放射線帯領域で発生し、相対論的電子加速過程において重要な役割を果たすとされるプラズマ波動ホイッスラーモード・コーラス放射の発生過程について着目し、従来の計算機資源では実現できなかった大きなシミュレーション空間と多数の粒子を用いた計算機実験を実施した。その結果、コーラス放射の波動特性を決定する要因がその具体的な値とともに明らかとなった。

1. はじめに

無衝突である宇宙プラズマ中でのプラズマ電磁場-粒子間のエネルギー交換は、様々な時間・空間スケールで生起する電磁プラズマ不安定を物理素過程として生じており、定量的な議論において計算機実験が大きな役割を果たしている。マクロな不安定としては、惑星電磁圏と太陽風との相互作用により生じ、背景プラズマおよび電磁場の配位を決定する磁気流体力学的な不安定が挙げられ、ミクロな不安定としては、荷電粒子の旋回運動程度の時空間スケールでの、運動論的なプラズマ不安定が挙げられる。宇宙プラズマ中での粒子加速・加熱過程は、様々な時空間スケールで生じる不安定性の結果として生じる現象の一つである。これらのプラズマ不安定は、現象の持つ強い非線形性のため理論的な取り扱いが困難であり、詳細な物理過程を理解し定量的に評価する上で、計算機実験が不可欠な役割を果たしている。

本研究課題では研究対象として、惑星電磁圏でのプラズマ粒子-波動間相互作用に関する計算機実験を取り上げる。シミュレーションコードとしては、マクロな不安定はMHDコード、ミクロな不安定についてはプラズマ粒子個々の運動を電磁場の時空間発展と共に解き進める粒子コードを用いる。特に今回は、先端的計算科学研究プロジェクトで2014年10月から12月までの3ヶ月間利用させていただいたPRIMEHPC FX10・192ノード・3072コアを活用して、地球磁気圏の放射線帯領域で自然発生するプラズマ波動、ホイッスラーモード・コーラス放射の発生過程についての計算機実験を実施した。本プロジェクトを通じて大規模計算機リソースを占有できたことにより、従来の計算機実験では実現できなかった大きなシミュレーション空間と多数の粒子による大規模プラズマ粒子シミュレーションが可能となった。

本計算機実験で対象とするコーラス放射は、宇宙天気・宇宙環境の研究分野で最重要課題の一つとして挙げられる「放射線帯相対論的電子の生成過程」において重要な役割を果たす事がこれまでの衛星観測・理論研究により明らかとなっており、近年盛んに研究が進められている現象である。計算機実験では、コーラス放射の発生過程を世界で初めて自己無撞着に再現し、また、コーラス放射の発生と同時に高効率な電子加速過程が生じる事を定量的に示したシミュレーションコードを用いる[Katoh and Omura, 2007a, 2007b, 2011, 2013]。本稿では、本研究課題により得られたコーラス放射発生過程に関する新たな知見について報告する。

2. 地球内部磁気圏・放射線帯での波動粒子相互作用

図1に本研究で対象とするプラズマ波動、コーラス放射の観測結果の一例を示す。コーラス放射は固有磁場を有する惑星の磁気圏で普遍的に観測されるプラズマ波動の一つとして知られている。時間的に周波数を上昇させる特徴的なスペクトルを示すコーラス放射は、半世紀を超える研究の歴史があるものの、その発生過程は未解明とされてきた。

これまでに申請者らが実施した計算機実験により、惑星電磁圏におけるプラズマ波動の励起過程ならびに粒子加速・加熱過程の双方で、惑星の固有磁場に捕捉された粒子が行う磁気赤道を中心とした南北両半球の往復運動（ミラー運動）が、現象を理解する上で鍵になる事が明らかになっている。ある磁力線上での固有磁場の強度分布は、磁気赤道で最小となり、高緯度になるほど大きくなっており、ミラー運動はこの背景磁場の空間勾配に起因する。このような非一様な構造の中で、粒子がプラズマ波動と相互作用することが、高効率な粒子加速・加熱過程を引き起こすための重要な要素となっている。この事はすなわち、実際の惑星電磁圏で生じている粒子加速・加熱過程の理解には、背景磁場の空間構造などの初期条件を現実の環境に即して設定し、計算機実験を実施する事が重要である事を示している。しかしながら、実環境下での計算機実験は、計算機資源の制約により実現が困難であった。

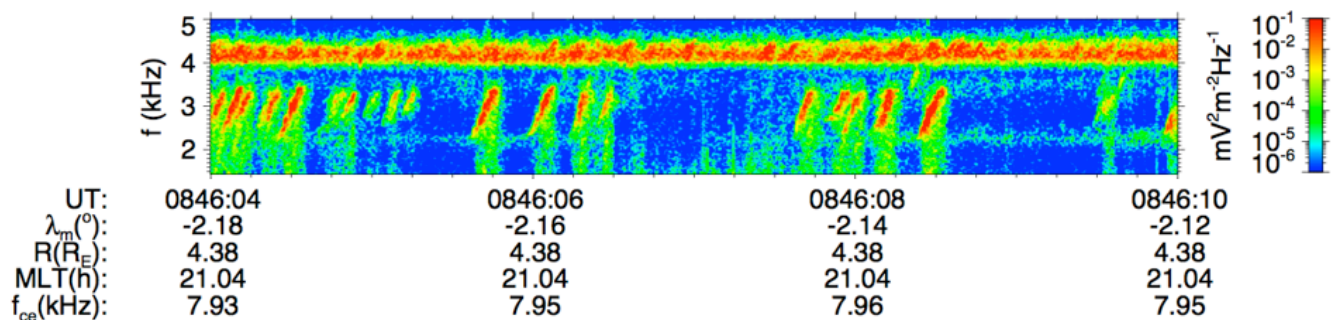
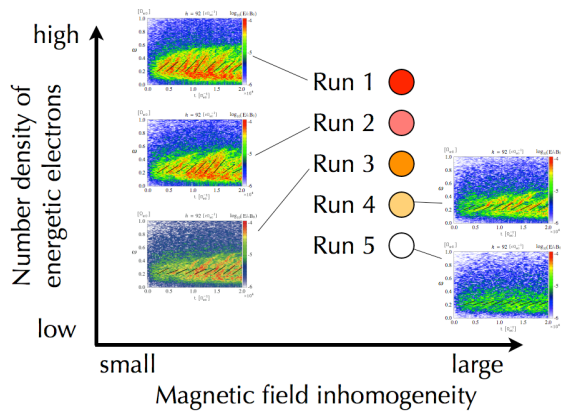


図1：CLUSTER 衛星による地球磁気圏赤道領域でのコーラス放射の観測結果 [Santolik et al., 2008]

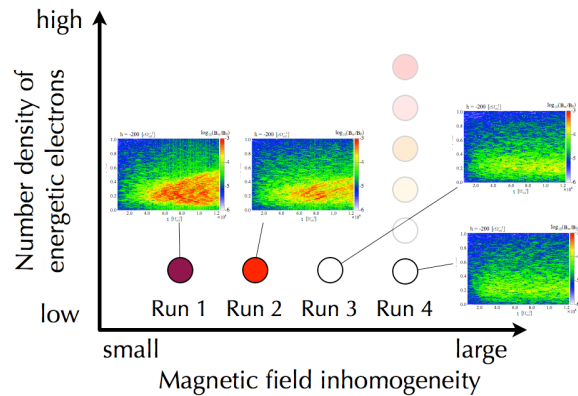
この点に関して、先端的計算科学研究プロジェクトによる大規模計算機リソースを活用する事により、より大きなシミュレーション空間と多数の粒子を用いた計算機実験が可能となった。本研究課題は、2012年度の同プロジェクトで採択いただいた課題で得られた成果をさらに発展させる課題と位置づけられる。空間スケールは現実の地球磁気圏放射線帯領域での値を設定し、個々の粒子運動を解くプラズマ粒子の個数は2億6千万個を用いて、1024コアでは実時間1週間の規模となる計算機実験を実施した。

その結果得られた結果のまとめを図3に示す。図3aでは、背景磁場の空間スケールを同一とした条件で、高エネルギー電子の数密度を変化させた場合に得られた計算結果（Case 1）を示している。この結果からは、コーラス放射の発生には一定の数密度が必要であり、また、数密度の増加に伴って波動強度やスペクトル特性が変化する様相が明らかになっている。一方図3bでは、コーラス放射の励起源となる高エネルギー電子の磁気赤道における初期条件を同一としたまま、背景磁場構造の空間スケールを変化させた場合の計算結果（Case 2）を示している。この結果から、高エネルギー電子の数密度が同一の条件でも、背景磁場の空間勾配の大きさに応じてコーラス放射の波動スペクトルが大きく変化する様相が明らかとされている。

(a) Summary of simulation results: Case 1



(b) Summary of simulation results: Case 2



(c) Properties of chorus generation

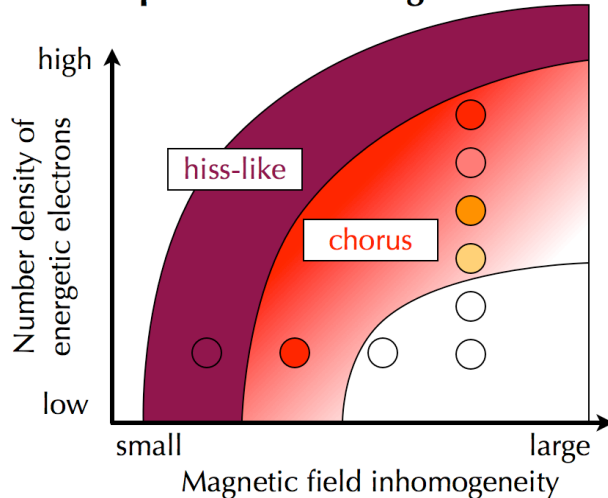


図3：計算機実験により再現されたコーラス放射のスペクトルの(a)高エネルギー電子の数密度と(b)背景磁場構造の空間スケールとをそれぞれ変化させた場合の計算結果。(c)計算結果から示唆されるコーラス放射発生条件とスペクトル特性のパラメータ依存性。

3. まとめと今後の課題

先端的計算科学研究プロジェクトによる計算機資源を活用して、惑星磁気圏において普遍的に見られるプラズマ波動、ホイッスラーモード・コーラス放射の発生過程に関する大規模計算機実験を実施した。2012年度にプロダクトラン課題として採択された研究内容を更に発展させ、コーラス放射の発生過程ならびにスペクトル特性を決定する要因について計算機実験結果に基づいて考察した。その結果、コーラス放射発生過程において高エネルギー電子の数密度ならびに磁気圏の空間スケールが及ぼす影響を、定量的に明らかにすることに成功した。今回の計算機実験により示されたコーラス放射の波動特性の変化は、相対論的電子の加速過程に対しても大きな影響を及ぼすと考えられる。計算機実験では一部の高エネルギー電子がコーラス放射により高効率に加速される様相も再現されており、今後も大規模計算機リソースの活用を捉えて、計算機実験により定量的な評価を実施する。

参考文献

- [1] Katoh, Y. and Y. Omura, Computer simulation of chorus wave generation in the Earth's inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L03102, doi:10.1029/2006GL028594, 2007.
- [2] Katoh, Y. and Y. Omura, Relativistic particle acceleration in the process of whistler-mode chorus wave generation, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L13102, doi:10.1029/2007GL029758, 2007.
- [3] Katoh, Y. and Y. Omura, Amplitude dependence of frequency sweep rates of whistler mode chorus emissions, *J. Geophys. Res.*, 116, A07201, doi:10.1029/2011JA016496, 2011.
- [4] Katoh, Y. and Y. Omura, Effect of the background magnetic field inhomogeneity on generation processes of whistler-mode chorus and hiss-like emissions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 4189-4198, doi:10.1002/jgra.50395, 2013.
- [5] Santolik, O. et al., Frequencies of wave packets of whistler-mode chorus inside its source region: a case study, *Ann. Geophys.*, 26, 1665-1670, 2008.