

宇宙プラズマ中における大振幅電磁波の伝搬過程についての研究

Study on Propagation Process of Large-amplitude Electromagnetic Waves in Space Plasmas

研究代表者：岩本 昌倫（神戸大学システム情報学研究科）

研究目的 (Research Objective):

宇宙には、太陽からの電波バーストをはじめとして、近年注目を浴びている高速電波バーストといった、大振幅電磁波を放出する天体現象が存在する。これらの大振幅電磁波は地球に到達するまでに、周囲の宇宙プラズマ中を伝搬してパラメトリック不安定を引き起こす。パラメトリック不安定とは波動・波動相互作用の一つであり、電磁波が散乱波とプラズマ波に変換される過程である。観測された電波信号にはこれまで通過してきた宇宙プラズマの情報が刻まれているため、パラメトリック不安定を理解することで、放射源におけるプラズマ環境を知ることができ、ひいては放射機構の同定につながると考えられている。本研究では数値シミュレーションを行い、大振幅電磁波へのパラメトリック不安定の影響を定量的に調べることを目的とする。

計算手法 (Computational Aspects):

本研究では、プラズマの標準的な第一原理計算手法である PIC(Particle-in-Cell)法を採用した。計算コードは従来の研究でも用いてきたものを使用し、数値計算およびそのデータ解析を行った。代表者は本コードの開発チームの一員であり、現在は「Wuming PIC」という名前で公開されている。本コードは高度に最適化されており、「富岳」をはじめとして「京」や「不老」など多くのスーパーコンピュータで動作実績がある。シミュレーション空間としては、20,000 格子点の1次元空間を考え、空

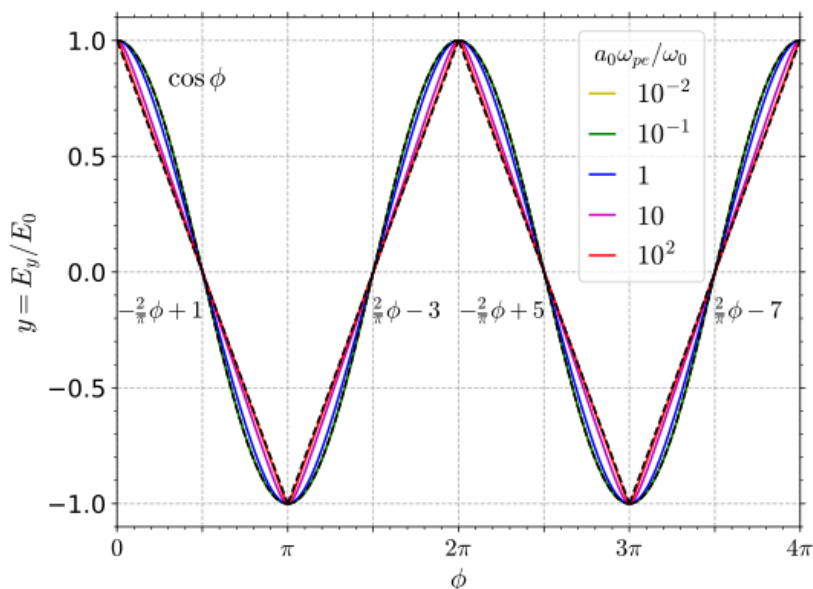


Fig. 1 振動電場の初期条件。縦軸が振幅、横軸が位相。

電磁波の1波長あたり100格子点で解像している。また、時間解像度は100分の1周期とした。粒子数については、1セルあたり100個の電子および陽電子、すなわち合計200個の粒子を扱っている。電子・陽電子プラズマは高エネルギー天体で実際に生じており、前述の高速電波バーストも周囲の電子・陽電子プラズマを通過していると考えられている。この1次元空間に直線偏光した大振幅電磁波を入射し、振幅・周波数・プラズマ温度を変えて計算を行った。入射する電磁波は、任意振幅の定常解を数値的に求め、それを初期条件として与えている(Fig. 1)。

研究成果 (Accomplishments) :

プラズマ温度が低い場合と高い場合、すなわちパラメトリック不安定がいわゆる弱結合領域と強結合領域になる場合でシミュレーションを行った。ただし、電子と陽電子の温度は等しいと仮定し、電磁波の振幅と周波数を変えてパラメトリック不安定の時間発展を追った。

シミュレーションから得られた、パラメトリック不安定の最大成長率および対応する散乱波の波数の振幅依存性を Fig. 2 に示す。振幅が大きくなるほど、成長率および波数の大きさがともに小さくなっていることがわかる。これは、大振幅の直線偏光電磁波の場合、プラズマが電磁波によって押されて電磁波の進行方向に振幅に比例した相対論的な速度でドリフト運動してしまうことに起因している。すなわち、特殊相対論的效果によって時間が遅れて成長率が小さくなり、また後方散乱された電磁波の波

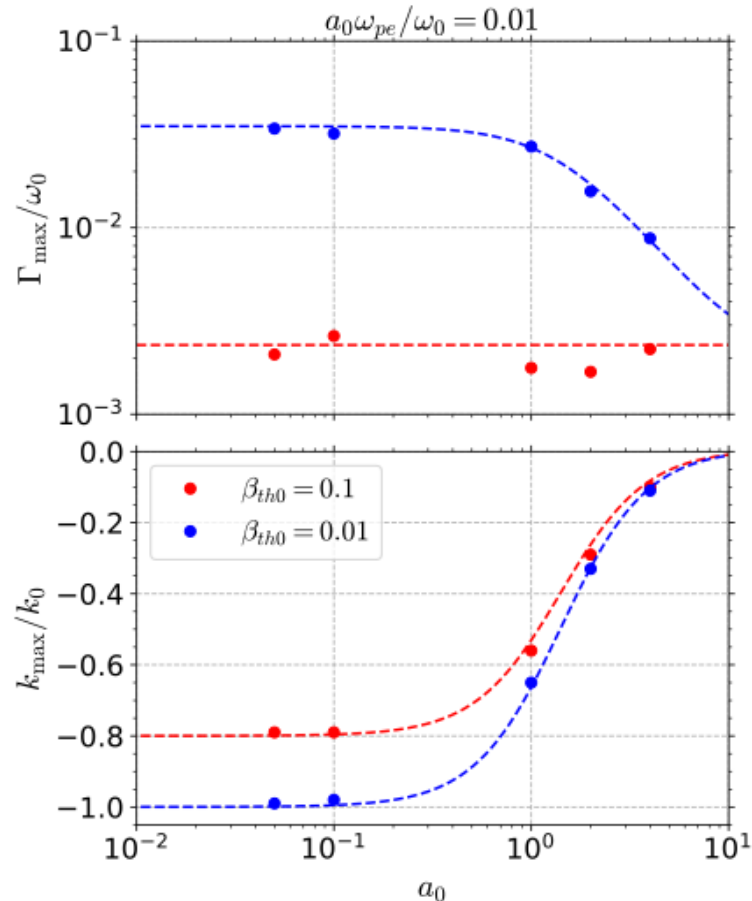


Fig. 2 最大成長率および対応する波数の振幅依存性。色はプラズマ温度に対応する。破線は理論解に相対論的補正を加えたもの。

長が引き伸ばされてしまうことに起因している。**Fig. 2** の点線は過去のパラメトリック不安定の研究で得られた理論解に相対論的補正を行ったものであり、シミュレーション結果を非常によく説明していることがわかる。

今回のシミュレーションにより、パラメトリック不安定の線形段階を明らかにすることができ、理論的予測も可能となった。しかし、飽和段階については未解明である。最大の要因は、前述の通り相対論的効果によりシミュレーション系において時間が遅れるため、飽和段階に達するまで振幅が大きいほど長時間の計算を行わなければならないことにある。また、今回は非磁化プラズマを考えていたが、宇宙プラズマは一般に背景磁場を持っているため、磁場の影響を評価する必要がある。磁場を加えた場合、プラズマ波動の種類が増えるため、パラメトリック不安定は更に複雑になる。今後は、さらなる長時間計算、及び磁場依存性の検討が必要である。

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. M. Iwamoto and K. Ioka, M. Iwamoto and K. Ioka, Parametric Instabilities of Intense Electromagnetic Waves in Electron-Positron Plasmas, SGEPS, Kobe, November 2026
2. M. Iwamoto and K. Ioka, Parametric Instabilities of Intense Electromagnetic Waves in Electron-Positron Plasmas, URSI-JRSM, Tokyo, March 2026