

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。