

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による電子加速

江崎 陽大 [1]; 松清 修一 [2]; 羽田 亨 [3]
[1] 九大・総理工・大海; [2] 九大・総理工; [3] 九大総理工

Electron acceleration through synchrotron maser instability in a relativistic electron-proton plasma

Yodai Esaki[1]; Shuichi Matsukiyo[2]; Tohru Hada[3]
[1] ESST, Kyushu Univ.; [2] ESST Kyushu Univ.; [3] IGSES, Kyushu Univ

The acceleration mechanism of high energy cosmic rays is still controversial. Neutron stars, active galactic nuclei and gamma-ray bursts are thought to be the possible sources of the cosmic rays. Furthermore, high-intensity electromagnetic radiations are observed around such high energy astrophysical objects. It is known that large-amplitude electromagnetic waves are excited in relativistic shock fronts by synchrotron maser instability (SMI). SMI is generated through the resonance between relativistic cyclotron motions of a plasma and electromagnetic waves. Previously, the SMI in an electron-positron plasma was extensively studied by Hoshino & Arons et al. (1991) and Iwamoto et al. (2017), but few studies have focused on SMI in an electron-proton plasma which is more general in space. In this presentation, we report the results of numerical simulation of SMI in an electron-proton plasma, using particle-in-cell simulation. The system has one spatial dimension(x direction) and the boundary conditions are periodic. The plasma is uniformly magnetized, with ambient magnetic field in the z-direction. The initial plasma distribution function is a ring distribution for both electrons and protons. The plasma temperature is $T_{e,p}/m_{e,p}c^2=3.9 \times 10^{-3}$, the Lorentz factor of the ring is $\gamma_0=40$, the relativistic cyclotron frequency $\Omega_{ce}/\omega_{pe}=2.23 \times 10^{-1}$, the mass ratio $m_i/m_e=20$, and the system size $L/(c/\Omega_{ce})=1.14 \times 10^2$. Two instabilities, electron-SMI and proton-SMI, are generated. The latter has larger spatio-temporal scales than the former. Some of the electrons accelerated by the electron-SMI are further accelerated efficiently by the proton-SMI. In the presentation we discuss linear dispersion relation of the electron- and proton-SMI.

観測される宇宙線のうち特にエネルギーの高いものについては、その加速機構はほとんどわかっていない。宇宙線の加速現場として考えられている中性子星や活動銀河核、ガンマ線バーストなどでは、高輝度の電磁放射も観測されており、上記のような高エネルギー天体では粒子加速と高輝度電磁放射が同時に起こっていると考えられる。粒子加速と高輝度電磁放射の両方を説明する物理機構としてシンクロトロンメーザー不安定性 (SMI) が知られている。SMIは、プラズマが磁力線垂直方向に相対論的な運動エネルギーを持つ場合に起こる不安定性で、相対論的なサイクロトロン共鳴によって電磁場を励起する。これまでに、Hoshino and Arons (1991) や Iwamoto et al. (2017) によって電子-陽電子プラズマ中の SMI の研究が行われているが、宇宙でより一般的な電子-イオンプラズマについてはあまり調べられていない。本研究では、電子-イオンプラズマ中の SMI の詳細を明らかにすることを目的とする。

相対論的電子-イオンプラズマ中の SMI について、1次元 Particle In Cell シミュレーションを用いて数値実験を行った。1次元 (x 方向) 周期境界を仮定し、一様背景磁場 (z 方向) のもと、一様な電子-イオンプラズマという条件で計算を行う。粒子の初期分布関数は、相対論的リング分布 (磁力線垂直方向に相対論的な運動エネルギーを持つ分布) とし、他の初期条件は、リング分布のローレンツ因子 $\gamma_0:40$, 温度 $T_e/m_e c^2:3.9 \times 10^{-3}$, 相対論的なサイクロトロン周波数とプラズマ周波数の比 $\Omega_{ce}/\omega_{pe}:2.23 \times 10^{-1}$, 質量比 $m_i/m_e:20$, システムサイズ $L/(c/\Omega_{ce}):1.14 \times 10^2$ とした。結果として、異なる時間帯で2つの不安定性が見られた。どちらの不安定性においても電磁場のエネルギーが上昇し、1つ目の不安定性では電子が、2つ目ではイオンがエネルギーを失っている。ここでは、1つ目の不安定性を電子 SMI、2つ目の不安定性をイオン SMI と呼ぶ。電子 SMI ではイオンのエネルギーはほとんど変化しておらず、これは電子 SMI がイオンの影響を受けないことを示唆している。イオン SMI の際には、電子もエネルギーを得ていることがわかった。また、電磁場の3方向成分それぞれについてのエネルギー-時間発展を見ると、電子 SMI ではそれぞれのエネルギーの増加に偏りがなかったことに対し、イオン SMI では電場の y 方向成分が他の成分に比べて大きく成長した。電子の運動量空間での分布を見ると、電子 SMI で分布が幅を持った後、イオン SMI で一部の電子が x 方向に大きく加速されていることがわかった。これらから電子は、イオン SMI によってエネルギーを得た y 方向電場と背景磁場による $E \times B$ ドリフトによって加速されたと考えられる。最終的に、被加速電子のエネルギーとイオンのエネルギーは同程度になった。以上の内容に加えて、相対論的電子-イオンプラズマの線形分散関係についても議論する。