

大振幅波動による粒子の異常エネルギー拡散

Anomalous Energy Diffusion of Charged Particles by Large Amplitude MHD Waves

蔵満 康浩 [1], 羽田 亨 [1]

Yasuhiro Kuramitsu [1], Tohru Hada [2]

[1] 九大・総理工・大気海洋

[1] Earth System Sci., Kyushu Univ., [2] ESST, Kyushu Univ

大振幅磁気乱流波動による荷電粒子の異常エネルギー拡散を議論した。波動が小振幅の場合は粒子と波動はサイクロトロン共鳴条件を満たすところで強い相互作用をし、粒子は共鳴速度を中心に波動に捕捉される。波動がある程度の振幅になると異なる波数、もしくは異なる伝搬方向を持つ波動でこの捕捉領域が重なり、粒子は2つ(以上)のセパトリクスを自由に動けるようになる。さらに波動の振幅が大きくなると、線形の共鳴速度とは別の速度の周辺に捕捉領域が形成される。つまり準線形理論では説明できないエネルギー拡散が引き起こされる。

宇宙プラズマは無衝突プラズマであり、種々の輸送は粒子と波動の相互作用を通して行われる。宇宙空間の様々な現象で観測される高エネルギー粒子・宇宙線の生成も波動と粒の相互作用が本質的な役割を担っている。また、実際に観測される磁気流体波動はしばしば大振幅である。例えば磁気圏衝撃波上流域における磁気流体波動の磁場振幅は、0次の磁場と同程度あるいはそれ以上である。ここでは粒子のエネルギー拡散過程において、波動が大振幅であるための効果を議論する。

波動のエネルギーが十分小さい範囲では、準線形理論とテスト粒子シミュレーションから得られるエネルギー拡散係数は良い一致を示す。しかし波動の振幅が大きくなると、数値実験から得られる加速効率準線形理論から得られる値を上回る。我々はこのエネルギー拡散係数が大きくなる要因について、大振幅波動と粒子の相互作用に着目し考察する。

波動が小振幅の場合には、粒子と波動はサイクロトロン共鳴条件を満たす位相空間の領域で相互作用をし、粒子は共鳴速度を中心とした領域に捕捉される。一方、波動がある程度の振幅になると異なる波数、もしくは異なる伝搬方向を持つ波動でこの捕捉領域が重なり、粒子は2つ(以上)のセパトリクスを自由に動けるようになる。これが数値実験値が準線形理論から予測される値とずれ始める有力な原因である。さらに波動の振幅が大きくなると、線形の共鳴速度の周辺の捕捉領域とは別に、そこから離れた速度帯に新たに捕捉領域が形成される。また、そもそも線形の共鳴条件を満たさないない波動でも、同様に捕捉領域が形成される。つまり準線形理論では起こり得ないエネルギー拡散が引き起こされる。

波動の振幅の効果による異常エネルギー拡散は、弱い非線形段階では、2つ(以上)の粒子の捕捉領域が重なり、粒子の速度空間の移動度が増すことによる。加えて、更に強い非線形段階では、線形のサイクロトロン共鳴速度とは離れたところに新たに捕捉領域が形成されることで、強いエネルギー拡散が引き起こされる。