

放射線帯電子の内部加速機構について

大村善治

京都大学生存圏研究所

omura@rish.kyoto-u.ac.jp

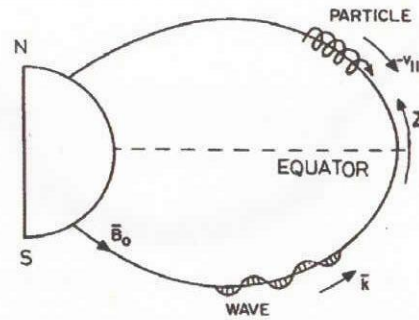
地球磁気圏放射線帯の相対論的電子の加速機構として、VLF ホイッスラーモード波のコーラス放射と高エネルギー電子との波動粒子相互作用が注目されている。ホイッスラーモード波は、磁力線に沿って伝播し、温度異方性を持った赤道面付近の高エネルギー電子とのサイクロトロン共鳴を通じて成長する。広い周波数スペクトルとそれを構成する波の位相がランダムであることを仮定して共鳴電子の速度分布関数と波のスペクトルの変化を記述する準線形理論が1960年代に提唱されている。その後の計算機シミュレーション研究の進展にもかかわらず、最近のコーラス放射による粒子拡散のモデルでは、準線形理論に基づく粒子拡散の計算がなされている。しかし、実際のコーラス放射は準線形理論で仮定されているような広帯域の波動ではなく、位相のそろった狭帯域の波動でありながらその周波数が短時間にダイナミックに変動するという特異な波動現象である。従って、準線形理論を用いてコーラス放射による粒子加速を論じることはできない。

本講演では、相対論的エネルギー（数100 keV～数 MeV）と位相のそろった単一周波数のホイッスラー波が磁気赤道付近で有効なサイクロトロン共鳴を起こし、波の振幅が十分に大きい場合（数 pT～数100 pT）には、共鳴粒子の一部を捕捉することによる効率良い加速できることを、テスト粒子シミュレーションを用いて示す。コーラス放射の発生メカニズムについては未だ十分な理解が得られていないが、ホイッスラーモード波が赤道付近で発生して高緯度に向かって伝播するモデルを考えると、振幅の増幅と周波数の上昇というコーラス放射の特性を定性的に説明することができる。このホイッスラーモード波を成長させているのは数十 keV の高エネルギー電子フラックスであり、そのエネルギーの一部がコーラス放射を介して、相対論的な電子に流れていると考えることができる。ここで、コーラス放射の伝播を支えているのは、背景のプラズマを構成しているコールド電子であり、物理モデルとして、コールド電子、温度異方性を持つ高エネルギー電子、および相対論的電子の3種類の電子群を考える必要があることに注意したい。コーラス放射および相対論的電子の生成機構を定量的に検証するには、人工衛星による観測において、放射線帯におけるこれらの電子フラックスとコーラス放射の振幅の高時間分解能のデータを多く取得し、磁気嵐との統計処理を重ねてゆくことが必要である。

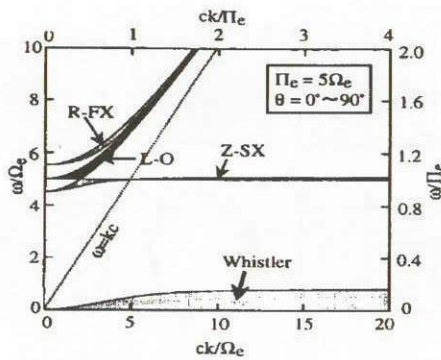
Background

- During the **recovery phase of a magnetic storm**, fluxes of relativistic (>1Mev) electrons in the inner magnetosphere (3<L<6) increase to beyond prestorm levels.
- The relativistic electrons are assumed to be generated by **resonant scattering** of electrons by enhanced **whistler mode chorus**.
- The resonant scattering is evaluated by Qasi-Linear Diffusion Theory with a **wide spectra of whistler mode waves** in a **homogeneous magnetic field model**.

Whistler Mode Wav-Particle Interaction in the Magnetosphere



Dispersion Relation for Electron Modes



Cyclotron Resonance Condition

$$\omega - kv_{||} = \pm |\Omega_e| (1 - v^2/c^2)^{1/2},$$

- + : Whistler Mode Wave (R mode)
- : EM Ion Cyclotron Wave (L mode)

Chorus Emissions observed by GEOTAIL

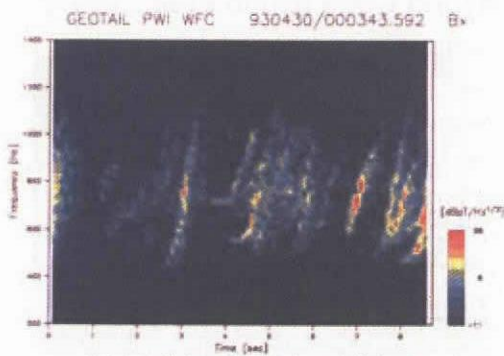
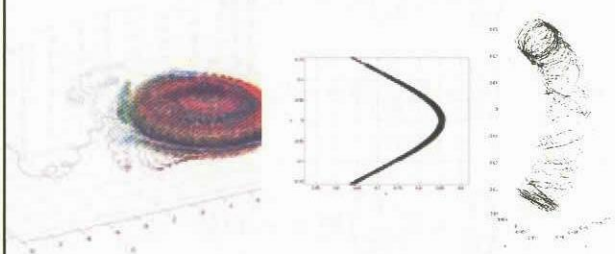
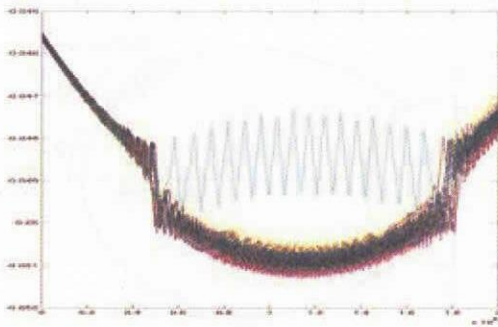


Plate 1. Direct H. Strong rising chorus and wave upward back events

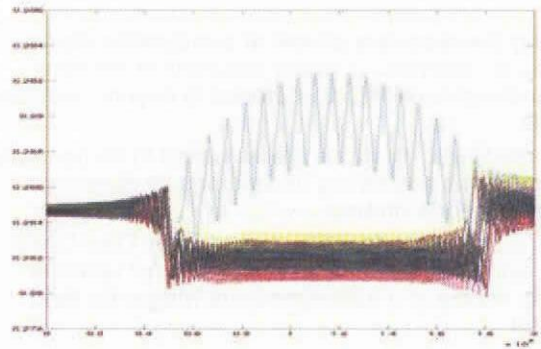
Electron Dynamics in Dipole Magnetic Field



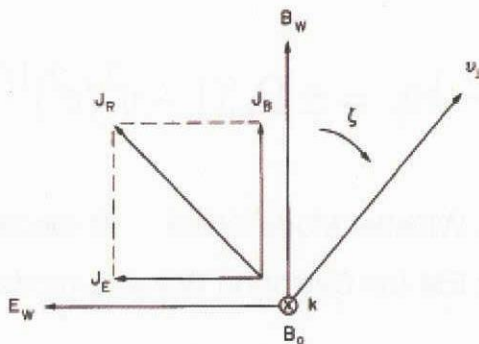
Parallel Velocity Variation with Whistler Mode Wave ($V_p > 0$)



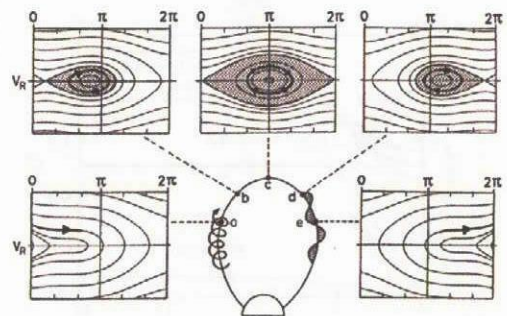
Kinetic Energy Variation



Vector Relations in Transverse Plane



Trapping Region in Phase Space



Field Equations for Whistler Mode Wave

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + V_g \frac{\partial}{\partial z}\right) B_w = -V_g A J_E$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + V_g \frac{\partial}{\partial z}\right) \phi = -V_g \frac{A J_B}{B_w}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + V_g \frac{\partial}{\partial z}\right) B_w^* = -A J_R^*$$

where $B_w^* \equiv B_w \exp(i\phi)$ and $J_R^* \equiv (J_E + iJ_B) \exp(i\phi)$.

Chorus Emission reproduced by Vlasov Hybrid Code [Nunn et al., 1997]

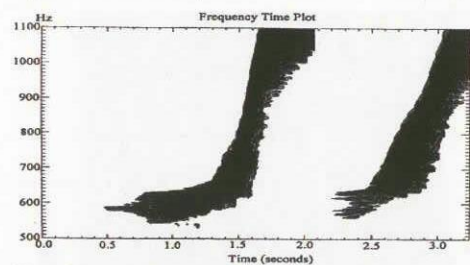
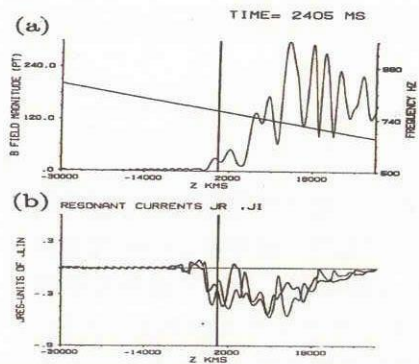


Figure 1. The f/t spectrogram of simulated rising frequency discrete emission (run A) presented as a shaded contour plot of spectral power. Such simulated risers are easy to produce, are stable, and are the most common simulation result.

Rising Tone Emissions

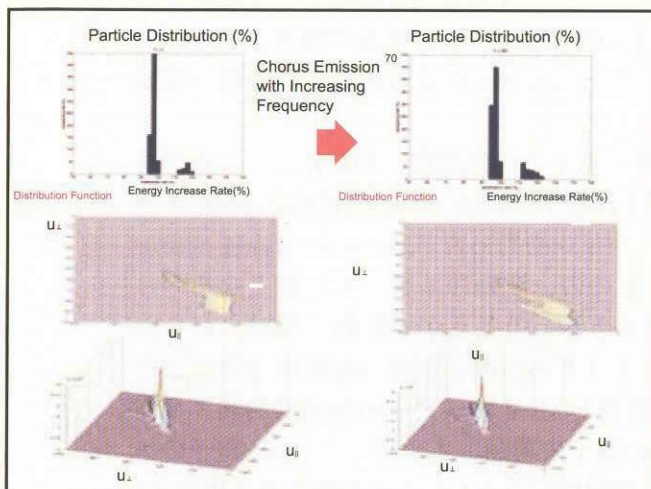
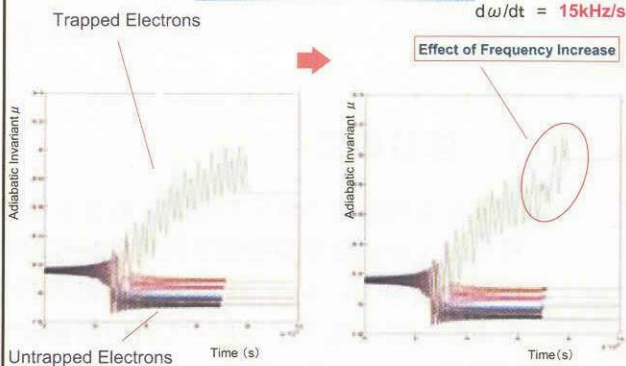


Dynamics of Trapped Electrons: Effect of Chorus Emission

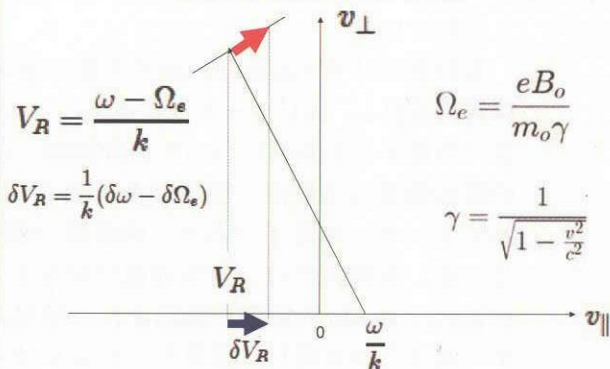
Frequency Increase of Chorus Emission causes Efficient Acceleration.

Constant Frequency v.s. Chorus

$d\omega/dt = 15\text{kHz/s}$



Trapping by a Chorus emission causes particle acceleration.



結論

- 赤道面で生成されたコーラス放射と赤道面に向かって走る高エネルギー電子との波動粒子相互作用
- 共鳴捕捉される粒子: 全共鳴粒子の10%程度
- 共鳴平行速度の絶対値の減少(垂直速度の増加)による捕捉粒子の効率的な加速
 - 赤道に向かう電子から見たサイクロトロン周波数の減少
 - コーラス放射の周波数上昇
 - 最大10~20%のエネルギー増加
- コーラス放射との相互作用の繰り返しによって一部の電子が徐々に加速を受ける
- 共鳴捕捉されない大部分の共鳴粒子は減速(ピッチ角が減少)されてPrecipitationしてゆく

References

- D. Nunn, Y. Omura, H. Matsumoto, I. Nagano and S. Yagitani, The Numerical Simulation of VLF Chorus and Discrete Emissions Observed on the Geotail Satellite Using a Vlasov Code, *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, pages 27,083-27,097, 1997.
- Y. Omura, D. Nunn, H. Matsumoto and M. J. Rycroft, A Review of Observational, Theoretical and Numerical Studies of VLF Triggered Emissions, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 53, pages 351 - 368, 1991.
- Y. Omura and H. Matsumoto, Computer Simulations of Basic Processes of Coherent Whistler Wave-Particle Interactions in the Magnetosphere, *Journal of Geophysical Research*, vol. 87, pages 4,435-4,444, 1982.
- H. Matsumoto and Y. Omura, Cluster and Channel Effect Phase Bunching by Whistler Waves in the Nonuniform Geomagnetic Field, *Journal of Geophysical Research*, vol.86, pages 779-791, 1981.
- Y. Omura, D. Summers, Computer simulations of relativistic whistler-mode wave-particle interactions, *American Institute of Physics*, Vol. 11, no. 7, pp. 3530-3534. 2004.