

京都大学	博士 (工学)	氏名	謝 怡凱 (HSIEH, YIKAI)
論文題目	Study on Nonlinear Acceleration of Electrons by Oblique Whistler Mode Waves		
<p>In this thesis, nonlinear interactions between obliquely propagating whistler mode waves and energetic electrons in the Earth's magnetosphere are analyzed. Most of the previous studies relating to whistler mode waves focus on parallel waves. This thesis is a significant study revealing the complicated dynamics in the Earth's radiation belt. There are 6 chapters in the thesis.</p> <p>Chapter 1 gives general introduction. The environments of the Earth's magnetosphere and the characteristic of whistler mode waves are introduced. Nonlinear theory of parallel whistler mode wave-particle interaction is described. The importance of extending researches from parallel waves to oblique waves is presented.</p> <p>In Chapter 2, propagation condition of an obliquely propagating coherent wave is analyzed by solving the cold plasma dispersion relation, and a wave model with the oblique whistler mode dispersion relation are developed. The relation between wave group velocities and the Poynting vectors of oblique whistler mode waves with frequencies 0.1–0.8 electron gyrofrequency is analyzed. The analyzed result shows that the wave group velocity propagates nearly parallel to the background magnetic field with wave frequency less than half the cyclotron frequency or a small wave normal angle. Thus, in the following chapters, one-dimensional simulations can be applied in calculating oblique wave-particle interactions. The numerical Green's functions are also introduced in this chapter.</p> <p>In Chapter 3, the gyroaveraging method, which reduces the simulation from two-dimensional to one-dimensional by averaging the cyclotron motion to the gyrocenter, is introduced. The validity of the method applied in oblique wave-particle interactions is confirmed. The evidences of separating multiple resonances in the gyroaveraging method are demonstrated, and the possible ranges of the resonances, which information is useful for numerical simulations, are calculated. Test particle simulations for constant wave models at different wave normal angles and electrons starting at different kinetic energies and equatorial pitch angles are performed to reveal the physical process and the efficiency of electron acceleration by multiple resonances.</p> <p>In Chapter 4, test particle simulations of electrons interacting with an oblique wave packet are performed. Tracing the evolution of relativistic electrons in a phase space of kinetic energy and equatorial pitch angle, numerical Green's functions of the chorus wave-particle interactions are obtained. Landau resonance and cyclotron resonance are compared by analyzing the electron acceleration and pitch angle scattering. There are some important findings. First, for relativistic electrons, the Landau resonance accelerate electrons more efficiently than the cyclotron resonance. The proximity between parallel group velocity and parallel phase velocity of oblique whistler mode waves makes interaction time of Landau resonance longer than</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	謝 怡凱 (HSIEH, YIKAI)
------	---------	----	---------------------

cyclotron resonance. The longer interaction time leads to more effective acceleration. Second, the effective acceleration is contributed by the wave perpendicular electric field rather than the parallel electric field.

In Chapter 5, the stationary wave condition, which leads to a long interaction time between an oblique wave packet and a Landau resonant electron, are introduced. Through test particle simulations of a wave propagating at a small wave normal angle, the formation mechanism of the frequency spectra gap at half the electron gyrofrequency of whistler mode chorus emissions is verified. Nonlinear wave damping through Landau resonance is one of the mechanisms dividing chorus emissions into the upper band and the lower band, while cyclotron resonance does not contribute to the damping for oblique waves. In addition, the nonlinear wave damping is due to parallel components of the wave and particles for low energy (~keV) electrons and perpendicular components for high energy (10~ keV) electrons.

The results of this thesis are summarized in Chapter 6, and some suggestions of future works are also listed in this chapter.

氏名	謝怡凱 (HSIEH, YIKAI)
----	--------------------

(論文審査の結果の要旨)

本論文はテスト粒子シミュレーションにより地球磁気圏放射線帯が存在する領域で発生する斜め伝搬ホイッスラーモード波であるコーラス放射と高エネルギー電子との非線形相互作用を解析したものである。先行研究においては磁力線に平行方向に伝搬する波と電子とのサイクロトロン共鳴のみが扱われていたが、新たに斜め伝搬波の粒子シミュレーションプログラムを開発して、放射線帯電子の生成とピッチ角散乱に関するランダウ共鳴過程とサイクロトロン共鳴過程の相違を比較した。本論文で得られた成果は以下のとおりである。

(1) 電子サイクロトロン周波数の半分以下で変動する周波数を特徴として持つ低域コーラス放射は、磁場に対する伝搬角が小さい場合において、その電磁界エネルギーが磁力線に沿って伝わることを示し、磁力線に沿った1次元モデルの計算機シミュレーションの有効性を検証した。

(2) 一定周波数の斜め伝搬ホイッスラーモード波と相対論的電子の相互作用において高次のサイクロトロン共鳴によって加速とピッチ角散乱が有効に起こることを示し、そのエネルギーと赤道ピッチ角依存性を明らかにした。

(3) 斜め伝搬コーラス放射との共鳴による電子の分布関数の変動を表すグリーン関数を数値的に解析し、磁力線方向の群速度と位相速度との相対速度が小さいことからサイクロトロン共鳴よりもランダウ共鳴の共鳴時間が長くなり、効率よく電子が加速されることを示した。

(4) ランダウ共鳴における相対論的電子加速においては、平行電場よりも垂直電場の方が大きく作用することが分かった。

(5) 斜め伝搬コーラス放射はサイクロトロン周波数の半分の周波数においてランダウ共鳴によって非線形減衰し、上側周波数と下側周波数のコーラス放射として分かれて観測されることを数値的に検証し、一方、サイクロトロン共鳴は波動の減衰には影響を与えないことを示した。

以上の通り、以上、本論文は斜め伝搬コーラス放射による非線形電子加速過程を解明した。相対論的電子のランダウ共鳴加速の解析は放射線帯の生成機構を理解する上で不可欠であり、本研究で開発された斜め伝搬波動のシミュレーションモデルは今後の放射線帯変動のモデリングにおいて重要な貢献を果たすものである。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年1月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 2018年3月30日以降