

## 磁気赤道面付近で観測されたイオン Butterfly 型ピッチ角分布の解析

# 芝原 光樹 [1]; 能勢 正仁 [2]; 宮下 幸長 [3]; Angelopoulos Vassilis[4]; Auster H. Uli[5]

[1] 京大・理・地; [2] 京大・理 地磁気資料解析センター; [3] 名大 STE 研; [4] SSL, UC Berkeley; [5] TUBS

### Analyses of butterfly pitch angle distributions of ions observed at magnetic equatorial region.

# Kohki Shibahara[1]; Masahito Nose[2]; Yukinaga Miyashita[3]; Vassilis Angelopoulos[4]; H. Uli Auster[5]

[1] SPEL, Kyoto Univ.; [2] DACGSM, Kyoto Univ.; [3] STEL, Nagoya Univ.; [4] SSL, UC Berkeley; [5] TUBS

Charged particles moving in the electromagnetic field of magnetosphere show various pitch angle distributions (PADs), such as isotropic, pancake, and butterfly PAD. A PAD of charged particles tells us the physical processes occurring along their orbits. Since one can know these processes from the PADs, it is important to investigate PADs. So far, processes creating the butterfly PAD, which can be seen in data of both ions and electrons, have been proposed by a lot of researchers. For example, magnetopause shadowing (Pfizer et al., 1969), radial flux gradient (Sibeck et al., 1987), pitch angle scattering caused by wave-particle interaction (Lyons et al., 1972; Lyons and Williams, 1975), and the effect of change of magnetic field configurations with conservation of the first and second adiabatic invariants of charged particles (Ebihara et al., 2008).

In this study, we investigate the butterfly PADs of ions observed by the THEMIS spacecrafts detected at L $\sim$ 5-6 and dusk-midnight sector near the magnetic equatorial region. We found that the shapes of the butterfly PADs and their occurring regions are dependent on energies of ions and L values. These results lead us to propose a new creating process different from the previous ones. Assuming a curved magnetic field configuration, we can describe the north-south directed motion of an equatorially westward drifting ion as a non-linear second differential equation. This type of equation is known as Mathieu's differential equation. Some physical parameters in this differential equation determine whether the solution will diverge or not. Using the Tsyganenko magnetic field model (Tsyganenko, 1989, 1993; Tsyganenko and Sitnov, 2005), we made a survey for ion energy and L value if the solution is diverging, and found that the parameters giving a diverging solution are roughly consistent with those of the butterfly PADs observed by the THEMIS spacecrafts.

Computing the trajectory of an ion with the same parameters by solving the Lorentz equation, we can also find that the ions oscillate to north-south direction with gradually increasing amplitude (diverging solution), violate the first adiabatic invariant (Buchner and Zelenyi, 1989), and finally start chaotic motions.

In this way, ions drifting magnetic equatorial regions with pitch angle of  $\sim$ 90 degrees may violate the first adiabatic invariant through this process. We suppose that this new process can explain the observed butterfly PADs.

磁気圏内の電磁場中を運動している荷電粒子が持つピッチ角分布は様々な形を取り、例えば isotropic 型、pancake 型、butterfly 型などが知られている。荷電粒子のピッチ角分布は粒子が自身の軌道上で経てきた種々の物理プロセスを物語り、それによって磁気圏物理の深い理解へとつながる。その意味でピッチ角分布を観測するのは非常に重要である。

butterfly 型ピッチ角分布はイオンでも電子でも観測されており、それを形作るプロセスとしては magnetopause shadowing (Pfizer et al., 1969; Sibeck et al., 1987)、radial flux gradient (Sibeck et al., 1987)、波動粒子相互作用によるピッチ角散乱 (Lyons et al., 1972; Lyons and Williams, 1975)、磁気擾乱の際における磁気赤道面付近での磁場構造の変化と第一・第二断熱不変量の保存の効果によるもの (Ebihara et al., 2008) など、多くの観測とそれに対する説明がなされてきた。

今回は THEMIS 衛星による観測を用いて、イオンが磁気赤道面付近の L $\sim$ 5-6、夕方~真夜中において butterfly 型ピッチ角分布を示している例を解析する。その形や発生地分布はエネルギー及び L 値依存性を持っている点に我々は注目し、従来の butterfly 型ピッチ角分布生成要因にはない新たな過程を考えた。

簡単な考察により、ピッチ角 $\sim$ 90度の磁気赤道面を西向きにドリフトしているイオンの南北方向の運動は2階の非線形常微分方程式に帰着する。この形は Mathieu の微分方程式と呼ばれるもので、物理パラメータの条件により解が発散するかどうかが決まる。そこで Tsyganenko 磁場モデル (Tsyganenko, 1989, 1993; Tsyganenko and Sitnov, 2005) を用いて、粒子のエネルギーと L 値を変えてその発散する条件を求めた。するとそれは L $\sim$ 5, 6 の真夜中付近となり、これは観測で得られた領域と概ね一致する。

この発散解を与える条件下で粒子に対する Lorentz 方程式を解きトラッキングすると、南北方向に振動し始め振幅が徐々に増大し(発散解)、ついには第一断熱不変量が破れ (Buchner and Zelenyi, 1989)、その後イオンは chaotic な運動を始める。

つまりこの過程は磁気赤道面付近をドリフトするピッチ角 $\sim$ 90度のイオンに対する、第一断熱不変量破れのトリガーとなるものである。これは新たな butterfly 型ピッチ角分布生成要因の1つとなりうる。