

S001-10

A 会場 : 11/4 PM2 (15:45-18:15)

16:35~16:50

Outer Heliosheath のリング分布の安定性における ion-Bernstein モードの影響

#岡田 卓郎¹⁾, 天野 孝伸¹⁾, 寺境 太樹¹⁾

¹⁾ 東大

Influence of ion-Bernstein modes on the stability of the ring distribution at the outer heliosheath

#Takuro Okada¹⁾, Takanobu Amano¹⁾, Taiki Jikei¹⁾

¹⁾UTokyo

The heliosphere is a bubble formed by the interaction of the solar wind and the interstellar medium, and its boundary is the limit of the influence of the solar wind. The Interstellar Boundary Explorer (IBEX) satellite observes energetic neutral particles called Energetic Neutral Atoms (ENAs) coming into the heliosphere from the outer heliosphere. IBEX observations have shown that the ENA forms a narrow band-like distribution on the sky maps, which is called the IBEX Ribbon. The most likely origin of the IBEX Ribbon is that the charge exchange occurs twice in the outer heliosheath. First, the protons in the solar wind and neutral particles of interstellar origin charge exchange in the heliosphere, and the protons become neutral particles. Some of these neutrals reach the outer heliosheath and become charged particles again through a second charge exchange. These charged particles are picked up by the interstellar magnetic field, and the pickup ions form a ring distribution in velocity space. The pickup ions with this ring distribution and the interstellar neutrals then charge exchange for the third time, and the solar wind-originated neutrals return to the heliosphere in this scenario. To explain IBEX Ribbon in this model, the ring distribution must remain stable from the second to the third charge exchange, but the ring distribution is generally known to be unstable and excites waves which make the original ring distribution isotropic through pitch angle scattering (e.g. Coates et al., 2009). In many cases, Alfvén ion-cyclotron (AIC) instability dominates and contributes significantly to the isotropization of the ring distribution; Florinski et al. (2016) showed that if the thermal velocity of the ring component is lower than that of the background protons, the AIC is stable in the linear phase and the ring distribution may be maintained. On the other hand, Min et al. (2018) performed simulations under conditions where AIC is stable. However, their results showed that even if the AIC is stable in the linear phase, the ring component is scattered by the mirror and the ion-Bernstein modes, which makes the AIC unstable in the nonlinear phase, and the ring distribution is not maintained stable. However, the hybrid simulation has low resolution and may not properly account for the effects of relatively short-wavelength ion-Bernstein modes. The ion-Bernstein modes may also be affected by the kinetic effects of electrons, and the validity of hybrid simulations that treat electrons as a fluid also needs to be examined.

We report the results of the study of the ion-Bernstein modes excited by ring distributions. Although the ring velocity and density differ from Min et al. (2018), high-resolution hybrid simulations show that short-wavelength and the near-perpendicular propagating ion-Bernstein mode were confirmed. This excitation of ion-Bernstein modes was not confirmed with the resolution used in Min et al. (2018), suggesting that high-resolution simulations are needed to accurately discuss the short-wavelength ion-Bernstein mode. In the hybrid simulation, the ion-Bernstein mode had a strong growth rate at an angle of 50 ~ 90 degrees relative to the background magnetic field. On the other hand, the propagation angles are 50 ~ 70 degrees in particle-in-cell (PIC) simulations with the same parameters and the growth rates obtained with PIC simulations are lower than that of the hybrid simulation. This difference may be attributed to the fact that the hybrid simulation ignores electron kinetic effects. We have indeed confirmed that the results of the linear analysis and the PIC simulation agree with each other, suggesting that the hybrid simulation does not accurately describe the ion-Bernstein mode.

In the future, we plan to investigate the influence of the ion-Bernstein mode and the validity of the hybrid simulation for parameters closer to the outer heliosheath.

太陽圏とは、太陽風と星間物質の相互作用によって形成される空間であり、その境界は太陽風の影響が届く限界で定義される。Interstellar Boundary Explorer (IBEX) 衛星は、outer heliosheath (太陽圏の外縁部) から太陽圏内に飛来する Energetic Neutral Atom (ENA) と呼ばれる高エネルギー中性粒子を観測する衛星である。IBEX の観測によって、ENA は天球図上で細い帯状の分布を形成することが分かっており、IBEX Ribbon と呼ばれている。この IBEX Ribbon の起源のメカニズムとして有力なものは、outer heliosheath で2回電荷交換が起こるというものである。まず太陽圏内で太陽風の陽子と星間空間起源の中性粒子が電荷交換をし、太陽風の陽子は中性粒子となる。この太陽風の陽子由来の中性粒子の一部が outer heliosheath に到達し、2回目の電荷交換によって再び荷電粒子になる。この荷電粒子が星間磁場にピックアップされ、ピックアップイオンは速度空間上でリング分布を形成する。その後、このリング分布をしたピックアップイオンと星間中性粒子が3回目の電荷交換をし、太陽風由来の中性粒子が太陽圏に戻ってくるというシナリオである。このモデルで IBEX Ribbon を説明するには、2回目の電荷交換から3回目の電荷交換までリング分布が安定に維持されていなくてはならないが、リング分布は一般には不安定であり、波動を励起し、その波動によってピッチ角散乱を受け等方化することが知られている (e.g. Coates et al., 2009)。多くの場合、Alfvén ion-cyclotron (AIC) と呼ばれる波動が支配的となり、リング分布の等方化に大きく貢献する。Florinski et al. (2016) では、リング成分の熱速度が背景プロトンの熱速度より低

ければ、線形段階において AIC は安定であり、リング分布が維持される可能性を示した。一方で Min et al. (2018) では、この AIC が安定となる条件でシミュレーションを行った。その結果、線形段階では AIC が安定となつていても、ミラーモードや ion-Bernstein モードによってリング成分が散乱されることによって、非線形段階では AIC が不安定となり、リング分布は安定に維持されないことが示された。しかし、このハイブリッドシミュレーションにおいては解像度が低く、比較的短波長の ion-Bernstein モードの効果が正しく考慮されていない可能性がある。また ion-Bernstein モードには電子の運動論効果が効いてくる可能性もあり、電子を流体として扱うハイブリッドシミュレーションの妥当性についても検討が必要である。

本発表では、リング分布が励起する ion-Bernstein モードについて調べた結果を報告する。Min et al. (2018) とはリング速度や密度が異なるが、高解像度のハイブリッドシミュレーションをすることで、短波長かつ垂直伝播に近い ion-Bernstein モードが確認された。この ion-Bernstein モードは Min et al. (2018) で用いられた解像度では確認できず、短波長の ion-Bernstein モードを正確に議論するには高解像度のシミュレーションが必要であることが示唆される。また、このハイブリッドシミュレーションでは ion-Bernstein モードは背景磁場に対して $50^\circ \sim 90^\circ$ の伝播角に、強い成長率を持っていたが、全く同じパラメータを用いた Particle-in-cell(PIC) シミュレーションでは $50^\circ \sim 70^\circ$ 程度となっており、ハイブリッドシミュレーションよりも成長率が低いことが分かった。この違いは、ハイブリッドシミュレーションが電子の運動論効果を見逃しているためだと考えられる。実際に、線形解析の結果と PIC シミュレーションの結果が一致することを確認しており、ハイブリッドシミュレーションは ion-Bernstein モードを正確に記述できていないことが示唆される。

今後はより outer heliosheath に近いパラメータにおける ion-Bernstein モードの影響・ハイブリッドシミュレーションの妥当性についても調査する予定である。