

오로라 지역 (Auroral Zone)에서의 전류에 의한 정전기적 불안정성 연구

- 입자모의 실험방법을 중심으로 -

金壽勇* 奥田英雄**

* 韓國科學技術大學 自然科學部

** 프린스턴대학교 플라즈마물리연구소

(1986년 12월 10일 접수; 1986년 12월 20일 수리)

A Study of Current Driven Electrostatic Instability on the Auroral Zone

- Based on Particle Simulation Methods -

S. Y. Kim

Department of Physics, Korea Institute of Technology
Tae-Jon Choongnam Korea

H. Okuda

Plasma Physics Laboratory, Princeton University
Princeton NJ 08544

(Received Dec. 10, 1986; Accepted Dec. 20, 1986)

요 약

최근에 알려진 위성이나 로켓트 데이터로부터 지구자기장에 수직인 방향으로 이온이 가속화된다는 사실, 즉 ion conics를 알고 있다. 이 현상과 오로라존에서 자주 발견되는 정전기적 파동이 밀접하게 관련된다고 믿고 있다.

플라즈마 이론과 1차원의 모의실험에 입각하여 전류에 의한 플라즈마 불안정성의 선형과 비선형이론을 고려한다. 모의실험으로부터 이온의 가속현상이 일어남을 볼 수 있다.

Abstract

According to recent satellite observations, strong ion transverse acceleration to the magnetic field (ion conics) has been known. The ion conics may be a result of electrostatic waves frequently observed on the auroral zone.

Both linear and nonlinear theory of electrostatic instability driven by an electron current based on 1-dimensional particle simulation experiment have been considered. From the results of simulation strong ion transverse acceleration has been shown.

I. Introduction

자기권물리학의 발달로 태양풍-자기권 dynamo 에 의하여 발생된 방전으로부터 오로라가 발생된다는 사실을 알고 있다. 이 dynamo 로부터 발생된 power 로 자기권 플라스마의 대류가 일어나며 이 대류가 극지방의 이온층과 연결된다(Axford and Hines, 1961). 이러한 대류는 자기장 방향의 전류(magnetic field aligned current)를 일으킨다. Dynamo의 power 는 10^{18} (erg/s)이며 자기장 방향의 전류밀도(field aligned current density)는 10^{-6} (A/m²)까지 커져서, 이온층으로부터 수천 km 떨어진 곳에 특수한 전위를 만들며 이 전위의 영향으로 전자들은 극지방의 이온층을 향하여 가속된다. 이 전위를 double layer 라고 부른다. 지구를 향하여 강하되는 전자들은 상층부의 대기층과 상호작용을 하여 이온화, 여기 등 복잡한 화학적 과정을 일으킨다. 오로라는 이와 같이 이온화되거나 여기된 원자나 분자들로부터 발생된다(Akasofu, 1981).

최근의 S3-3 위성(2,000 ~ 8,000km 고도)과 ISIS 위성(2,000 km 이하의 고도) 으로부터 얻어진 데이터로부터 ion conics 가 형성됨을 알았다(Sharp et al., 1977, Klumpar 1979). Pitch angle 이 $90 \sim 110^\circ$ 에서 이온분포가 최대가 되는 현상을 ion conics 라고 부른다. 즉, 지구의 자기장과 수직인 방향으로 이온이 가속됨에 따라서 일어나는 현상이다. S3-3 데이터로부터 electrostatic ion cyclotron wave(EIC wave)와 자기장 방향의 전류 사이의 상관관계를 연구하였다(Cattell, 1981). 지금까지 이온의 수직방향가속은 EIC wave 에 의한다고 믿어 왔다.

그러나 ion conics 는 모든 current region 에서 일어나는 반면에 Region-1 current 영역의 evening sector 에서 주로 EIC wave 가 발견되었다. Gorney et al.(1981)가 지적한 바

와 같이 magnetic substorm이 없을 때 ($K_p \leq 3$) 2,000km 이상의 고도에서 일양하게 ion conics가 발견되는 반면에 $K_p \geq 3$ 인 magnetic substorm이 일어날 때에 4,000km 이상의 고도에서 높이가 증가함에 ion conics가 발견되는 횟수는 증가한다. 최근에 lower hybrid wave frequency 근처의 플라즈마파가 발견되었다(Gurnett and Frank, 1972).

Free energy source를 가진 기울기가 (+)인 electron 분포함수 위에 wave-particle resonance 현상 때문에 정전기파동이 일어날 수 있다(Coppi et al., 1976). Lower hybrid frequency의 진동수를 가진 mode는 wave-particle interaction을 통하여 ion과 resonance 현상을 일으키며 전자로부터 이온들로 에너지가 운반된다. 실험실 플라즈마와 우주공간 플라즈마의 경우 모두 lower hybrid wave의 이론은 흥미 있는 분야이다.

자기권으로부터 오로라존으로 날아드는 고속의 전자에 의하여 생성되는 플라즈마 불안정성과 이와 부수되어 발생하는 1,500 ~ 4,000 km의 고도에서 관측되는 ion conics에 대하여 고찰하기로 한다. 이러한 목적을 위하여 analytic theory와 particle simulation technique을 이용한다(S. Y. Kim, 1986).

II. Linear Theory

이온과 전자의 relative drift로 생기는 two-stream instability에 대한 linear theory는 이미 잘 알려져 있으므로(Drummond and Rosenbluth, 1962). 여기에서는 간단히 그 이론의 결과에 대하여만 서술한다.

Maxwell 이온과 drifting Maxwell 전자 사이에서 생기는 current driven 정전기적 불안정성의 dispersion relation은

$$1 + \frac{1}{k^2 \lambda_i^2} \left[1 + \frac{\omega}{\sqrt{2} k v_i} Z\left(\frac{\omega}{\sqrt{2} k v_i}\right) \right] + \frac{1}{k^2 \lambda_e^2} \left[1 + \frac{\omega - k_{\parallel} v}{\sqrt{2} k_{\parallel} v_e} Z\left(\frac{\omega - k_{\parallel} v}{\sqrt{2} k_{\parallel} v_e}\right) \right] + \frac{\omega_{pe}^2}{\Omega_e^2} \frac{k_{\perp}^2}{k^2} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

으로 주어지며 ω , k , v_e , v_i , v , Ω_e , λ_e , λ_i 는 각각 진동수(복소수), 파동수, 전자의 thermal speed, 이온의 thermal speed, 전자의 drift speed, 전자의 gyrofrequency, 전자의 Debye 길이, 이온의 Debye 길이이다. 한편, Z 는 플라즈마의 dispersion function이다(Krall and Trivelpiece, 1973). ω_{pe} 는 플라즈마 진동수이고, k_{\perp} 과 k_{\parallel} 는 각각 \vec{k} 벡터의 지구 자기장과의 수직, 그리고 수평방향의 성분을 뜻한다. $\Omega_i \ll \omega \ll \Omega_e$ 과 $\rho_e \ll k^{-1} \ll \rho_i$ 이므로 전자는 highly magnetized로 되어 있고 이온은 unmagnetized 되어 있다고 가정하였다. 전자와 이온의

속도분포함수는 각각

$$f_e(\bar{u}) = \frac{n_e}{(2\pi T_e/m_e)^{3/2}} \exp\left[-\frac{m_e(\bar{u}-v)^2}{2T_e}\right] \dots\dots\dots (2)$$

과

$$f_i(\bar{u}) = \frac{n_i}{(2\pi T_i/m_i)^{3/2}} \exp\left[-\frac{m_i\bar{u}^2}{2T_i}\right] \dots\dots\dots (3)$$

으로 주어졌으며 v 는 전자의 자기장과 평행인 방향으로의 drift speed 이다.

우주공간 플라즈마 또는 실험실 플라즈마에 적절한 isothermal 수소 플라즈마($m_i/m_e=1836$, $T_e/T_i=1$)의 dispersion relation 을 수치 해석 방법을 통하여 식 (1)을 풀어서 구한다. 그림 1 (a), (b)와 (c)는 진동수가 lower hybrid frequency 근처에서 일어나는 불안정성의 real frequency 와 growth rate 를 보여 준다. 이 때 mode 의 전파각도는 일정하며 $k_{||}/k = 0.05$ 이다. $\Omega_e/\omega_{pe} = 2$ 이다($k\lambda_e = 0.4$ (a), $k\lambda_e = 0.5$ (b), $k\lambda_e = 0.6$ (c)).

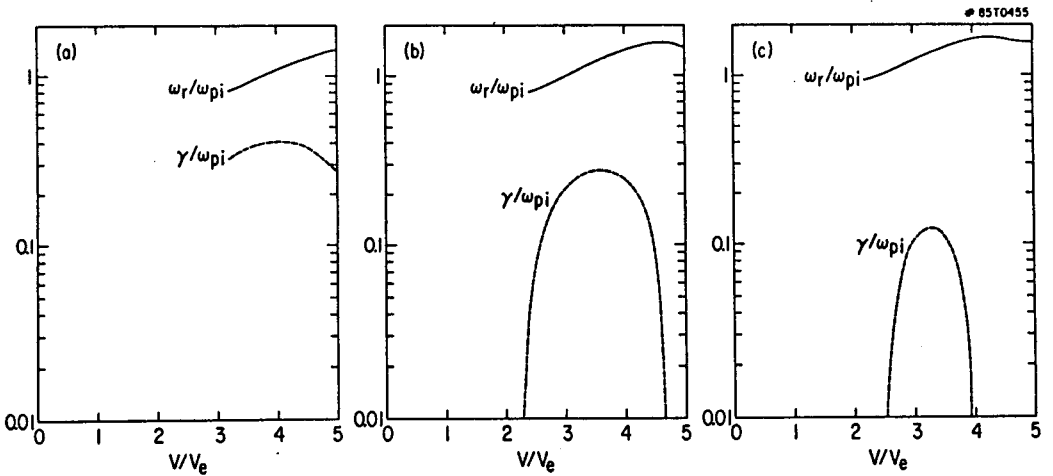


Fig. 1. Numerical solutions of the dispersion relation given by Eq. (1) for hydrogen plasma with respect to drift speed, v/v_e . $\Omega_e/\omega_{pe} = 2$, $T_e/T_i = 1$, and $k_{||}/k=0.05$. $k\lambda_e=0.4$ (a), $k\lambda_e=0.5$ (b), and $k\lambda_e=0.6$ (c).

$k_{\perp}/k_{\parallel} \ll 1$, $\omega/k_{\parallel} \gg v_e$, $\omega/k_{\perp} \gg v_i$ 일 때 식 (1)을 해석적으로 풀면,

$$\frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2} = 1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\Omega_e^2} + \frac{T_e}{T_i} \left[1 + \frac{\omega - k_{\parallel} v}{\sqrt{2} k_{\parallel} v_e} Z \left(\frac{\omega - k_{\parallel} v}{\sqrt{2} k_{\parallel} v_e} \right) \right]$$

으로 주어지며 $\gamma \ll \omega_r$ ($\gamma = \text{growth rate}$, $\omega_r = \text{real frequency}$)의 가정하에

$$\omega_r^2 = \frac{\omega_{pi}^2}{1 + \alpha^2}; \quad \alpha^2 = \frac{\omega_{pe}^2}{\Omega_e^2} + \frac{T_i}{T_e} (1 + \rho Z_R(\rho)), \quad \rho = \frac{\omega - k_{\parallel} v}{\sqrt{2} k_{\parallel} v_e}$$

이 된다. 따라서 real frequency가 ω_{pi} 근처에 놓이게 된다. 그리고 Z_R 은 플라스마 dispersion function의 실수부이다.

III. Simulation

전자 전류(electron current)에 의하여 낮은 고도상의 auroral field lines 위에 발생하는 electrostatic turbulence 뿐만 아니라 수소이온의 tranverse heating(ion conics) 현상을 설명하기 위하여 1-dimensional 모의실험모형을 고려한다. 이 모의실험은 입자를 이용한 모델이다.

모의실험모형은 conventional initial value problem에 바탕을 두었으며(Okuda and Ashour-Abdalla, 1981), 초기의 free energy source를 가진 electron distribution이 시간에 따라서 불안정성과 관련되어 어떻게 변화하는가를 관찰하는 것이다. 여기서는 $1\frac{3}{2}$ dimensional 모의실험모형을 사용하였으며 입자들의 위치는 한 방향, 즉 x -좌표로만으로도 기술하고 속도는 세 방향 모두 v_x , v_y , v_z 를 사용하였다.

모의실험에서 wave vector \vec{k} 는 x 방향만을 가리키며, 외부에서 가해지는 자기장은 가상적인 $x-z$ 평면상에 놓여지며, $B_z \gg B_x$ 이다. 이온의 운동은 전절에서와는 달리 자기장 속에서 gyration하며 움직이는 입자로 취급하여 finite-difference 방법을 이용하며, 컴퓨터시간을 절약하기 위하여 전자의 경우 자기장에 평행인 방향에서는 finite-difference 방법을 쓰고 수직인 방향으로는 predictor-corrector 방법을 병행하는 guiding center 만을 이용하는 guiding center approximation 방법(Lee and Okuda, 1978)을 사용하였다.

모의실험에 사용한 플라스마 parameter는 system의 길이 $L = 256 \Delta$, $\Omega_e/\omega_{pe} = 2.5$, $m_i/m_e = 1836$, $\omega_{pe} \Delta t = 5$, $k_{\parallel}/k = B_x/B = 0.025$, $T_e/T_i = 1$, 그리고 drift speed $v = 5v_e$ 이다. Δ 는 전자의 Debye 길이와 같은 grid의 크기이다. Δt 는 컴퓨터의 computing step이며,

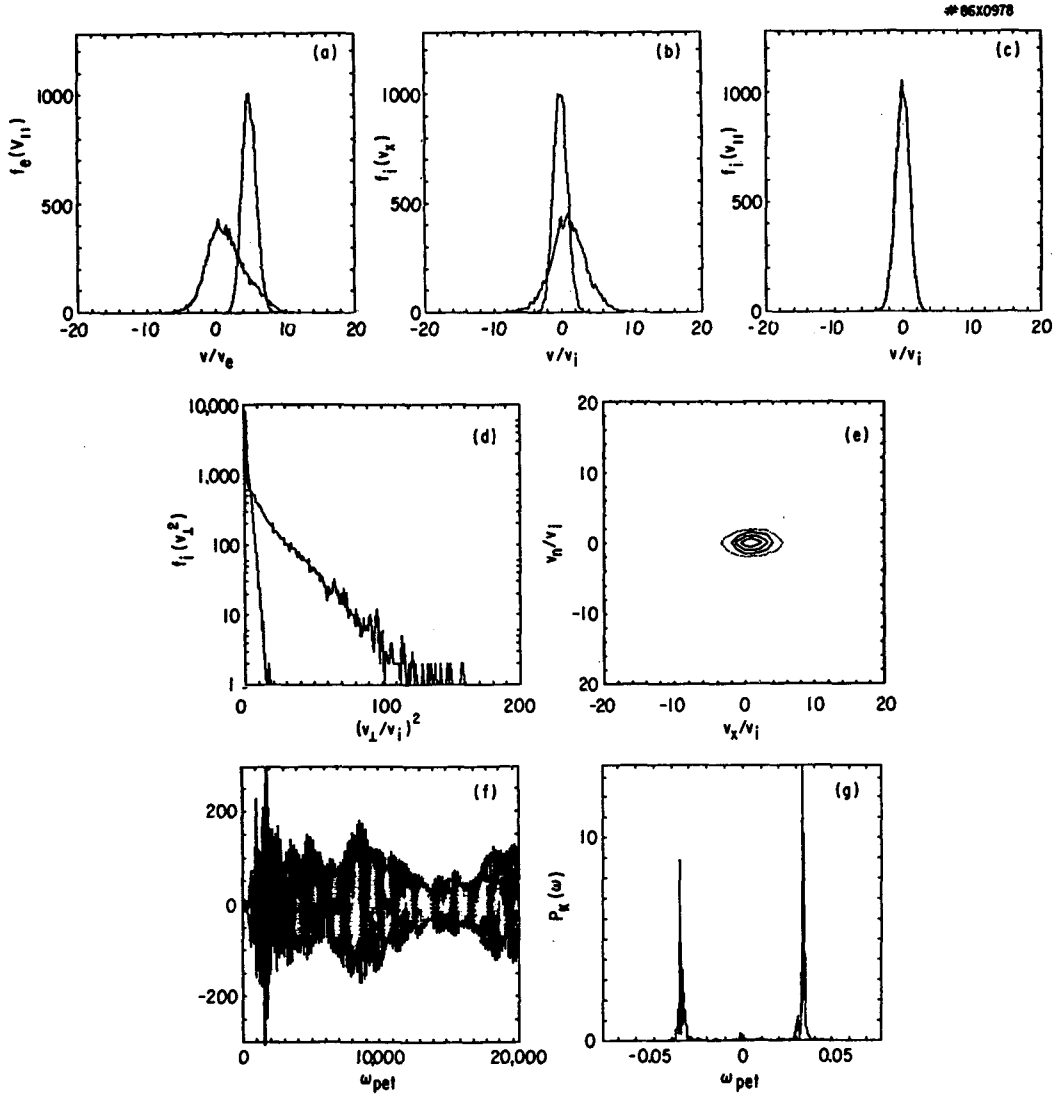


Fig. 2. Initial and final electron parallel velocity distribution (a), ion perpendicular velocity distribution (b), ion parallel velocity distribution (c), and ion perpendicular kinetic distribution (d). The contour plot of ion distribution in the velocity space (v_x, v_y) at final time (e). The time history (f) and frequency spectrum (g) of model.

만일 guiding center approximation 을 사용하지 않을 때 이 값은 $\omega_{pe}\Delta t < 0.2$ 이어야만 한다.

그림 2에 $t = 0$ (초기 시간)과 $t = 465.3\omega_{pe}^{-1}$ (마지막 시간)에서의 입자속도분포함수의 그래프가 들어 있다 (a)는 전자의 자기장과 평행성분의 속도분포, (b)는 이온의 수직성분의 속도분

포, (c)는 이온의 평행성분의 속도분포함수이다). 이 때 drifting 전자는 비교적 강한 free energy를 가지고 있으므로 불안정성이 급격하게 일어나며, 따라서 비선형 효과에 의하여 전자의 속도확산이 세게 일어난다. 전자속도분포함수의 (+)기울기가 이 확산과정에서 (-)기울기로 바뀌어 더 이상의 free energy공급이 정지되어 nonlinear saturation이 일어난다.

한편, 전자의 확산과 더불어 그림 2(b)에서는 자기장과 거의 수직으로 전파되는 플라즈마 불안정성에 의한 파동 때문에 이온이 수직방향으로 가속되는 것을 볼 수 있다. 바로 이러한 현상이 관측과 실험에 의하여 알려졌다. 한편, 이온의 자기장과 평행을 이루는 속도분포함수는 크게 변화하지 않는다.

그림 2(d)와 (e)는 각각 $t=0$ 과 $t=465.3\omega_{pi}^{-1}$ 에서의 이온의 수직성분의 운동에너지와 $t=465.3\omega_{pi}^{-1}$ 에서의 이온속도공간($v_{iy} - v_{ix}$)의 contour plot을 그린 것이다. 이온의 수직성분의 온도는 불안정성의 진행과 함께 갑작스럽게 상승하여 $T_{\perp}/T_{\parallel}(0)$ 의 값이 약 3으로 천천히 saturation한다. 처음에 이온의 ($v_{iy} - v_{ix}$)의 contour plot이 isotropic이었으나 이온이 진폭이 큰 불안정성과 관련된 파동과의 상호작용으로 conical 이온의 분포가 된다.

그림 2(f)와 (g)는 mode 1($k_x = 2\pi/L_x$)의 시간에 따른 변화와 Fourier transform에 의한 주파수 스펙트럼을 보여 준다. 여기서 ω_{pi} 의 주파수를 가진 lower hybrid wave의 발생과 시간에 따라서 진폭이 커지는 과정을 관찰할 수 있다. 따라서 lower hybrid wave가 이온의 수직방향 가속을 유발시킨다는 사실을 확인할 수 있다.

그림 3에서는 전자와 이온들의 위상공간($x - v_x$)의 분포가 주어졌다. $t = 11.6\omega_{pi}^{-1}$ (a), $t = 23.3\omega_{pi}^{-1}$ (b), $t = 81.4\omega_{pi}^{-1}$ (c)와 $t = 465.3\omega_{pi}^{-1}$ (d)에서 전자의 위상공간의 변화를 볼 수 있다. $t = 116\omega_{pi}^{-1}$ (e), $t = 23.3\omega_{pi}^{-1}$ (f), $t = 81.4\omega_{pi}^{-1}$ (g)와 $t = 465.3\omega_{pi}^{-1}$ (h)에서 이온의 위상공간의 변화를 볼 수 있다. 불안정성의 진행과 더불어 전자와 이온분포의 vortex 구조가 일어났다가 saturation시에 이 구조가 사라지면서 입자 궤도의 randomization이 발생된다.

IV. Conclusion

1차원의 모의실험을 통하여 lower hybrid frequency 근처에서 일어나는 전류에 의한 정전기적 불안정성의 생성과 진화에 대하여 고찰하였다. Conventional initial value problem을 이용하여 처음에 free energy source를 가진 전자를 공급하고 나서 플라즈마계가 어떻게 변화하는가를 관찰하였다. 이러한 플라즈마불안정성의 존재와 함께 플라즈마 입자의 동역학의 변화로 인하여 이온의 수직방향가속현상이 일어남을 확인할 수 있었다.

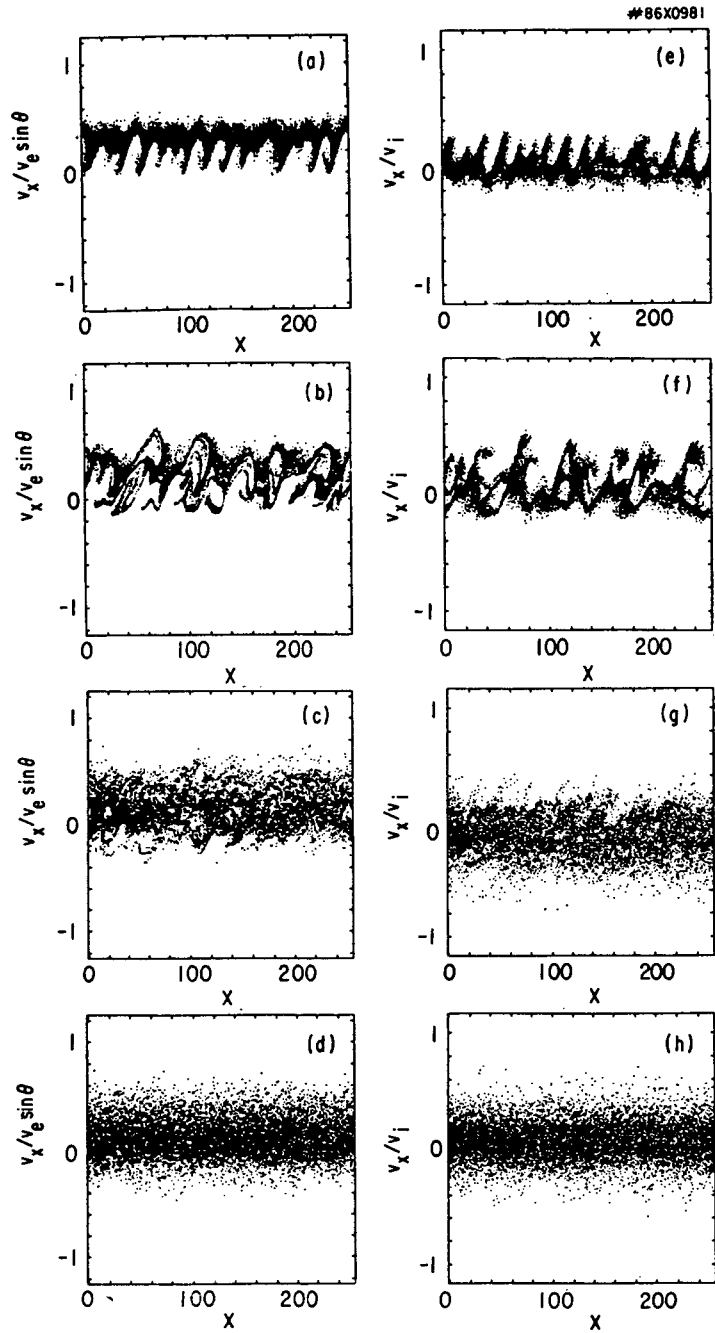


Fig. 3. Phase space plots of electron ($x-v_x$) at time $t=11.6 \omega_{pi}^{-1}$ (a), $t=23.3 \omega_{pi}^{-1}$ (b), $t=81.4 \omega_{pi}^{-1}$ (c), and $t=465.3 \omega_{pi}^{-1}$ (d). Phase space plots of ion ($x-v_x$) at time $t=11.6 \omega_{pi}^{-1}$ (a), $t=23.3 \omega_{pi}^{-1}$ (b), $t=81.4 \omega_{pi}^{-1}$ (c), and $t=465.3 \omega_{pi}^{-1}$ (d).

References

- Akasofu, S.-I. 1981, *Space. Sci. Rev.*, **28**, 121.
- Axford, W. I., and Hines C. O. 1961, *Can.J. Phys.*, **39**, 1433.
- Cattell, C. A. 1981, *J. Geophys. Res.*, **86**, 3641.
- Coppi, B., Pegoraro, F., Pozzoli, R., and Rewoldt G. 1976, *Nucl. Fusion*, **16**, 309.
- Drummond, W. E. , and Rosenbluth, M. N. 1962, *Phys. Fluids*, **5**, 1507.
- Gurnett, D. A., and Frank, L. A. 1972, *J. Geophys. Res.*, **77**, 172.
- Gorney, D. J., Clarke, A., Croley D., Fennell J., Lehman J., and Mizera P. 1981, *J. Geophys. Res.*, **86**, 83.
- Kim, S. Y. 1987, *Submitted to New Physics*(Korean Edition).
- Krall, N. A. and Trivelpiece, A. W. 1973, *Principle of Plasma Physics*, McGraw-Hill Company, New York.
- Klumpar, D. M. 1979, *J. Geophys. Res.*, **84**, 4229.
- Lee, W. W., and Okuda, H. 1978, *J. Comput. Phys.* **26**, 139.
- Okuda, H., and Ashour-Abdalla, M. 1981, *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 811.
- Sharp, R. D., Johnson, R. G., and Shelly, E. G. 1977, *J. Geophys. Res.*, **82**, 3224.