

空间等离子体中二维电子相空间空洞*

陆全明, 黄 灿

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要: 利用二维粒子模拟方法分别研究了弱磁化($\Omega_e = 0.5\omega_{pe}$, 其中 Ω_e 和 ω_{pe} 分别为电子的回旋频率和等离子体频率)和强磁化($\Omega_e = 2.0\omega_{pe}$)等离子体中电子双流不稳定性激发静电波的非线性演化过程. 结果表明, 在这两种情况下, 基本的物理过程都是一个几乎单色的静电波在波动的线性阶段被激发, 随后在非线形阶段这个静电波的波形互相合并, 直至最后形成一个或几个静电孤立结构, 这些结构对应于电子速度相空间中的空洞. 所不同的是, 在弱磁化等离子体中, 形成的孤立波有着二维结构, 即在两个方向都是有界的. 而在强磁化等离子体中, 所形成的孤立波是准一维的, 即在平行于背景磁场方向是有界的, 而在垂直于背景磁场方向是无界的, 但是在此方向上无论是平行还是垂直电场都是有变化的. 如沿着平行于背景磁场的方向切割静电孤立结构, 这两种情况下的孤立波的平行电场都具有双极结构, 而垂直电场有单极结构, 这些结果和在地球极区上空的观测相符. 另外, 在强磁化等离子体中, 电子空洞可激发静电哨声波, 并破坏这些静电孤立结构, 直至静电哨声波足够强后这些静电孤立结构消失.

关键词: 电子空洞; 静电孤立结构; 粒子模拟; 静电哨声波

中图分类号: P354, O534 **文献标识码:** A

Two-dimensional electron phase-space holes in space plasmas

LU Quan-ming, HUANG Can

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Two-dimensional (2D) electrostatic particle-in-cell simulations were performed to investigate the nonlinear evolution of electron bi-stream instability in weakly ($\Omega_e = 0.5\omega_{pe}$, where Ω_e and ω_{pe} are the electron cyclotron frequency and electron plasma frequency, respectively) and strongly ($\Omega_e = 2\omega_{pe}$) magnetized plasma. The results show that nearly monochromatic electrostatic waves are firstly excited, then these waves coalesce with adjacent waves. At last one or several solitary waves are formed, which corresponds to electron phase-space holes. In weakly magnetized plasma, these holes have two-dimensional structures, which are isolated in both directions parallel and perpendicular to the background magnetic field. In strongly magnetized plasma, these electron holes have quasi-one-dimensional structures. The parallel extent is limited while the perpendicular extent is unlimited. However, the amplitude of the electric fields is varied along the perpendicular direction. In both cases, in these holes, the parallel cut of the parallel electric field (E_x) exhibits bipolar structures while the perpendicular electric field E_y is

* 收稿日期: 2007-05-24; 修回日期: 2007-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(40674093, 40336052)和教育部博士学科点专项科研基金(96035815)资助.

作者简介: 陆全明(通讯作者), 男, 1969年生, 博士/教授. 研究方向: 空间等离子体物理. E-mail: qmlu@ustc.edu.cn;

Tel: 0551-3607657

unipolar. The results are consistent with observations in auroral region. We also find that electrostatic whistler waves are unstable in strongly magnetized plasma, which can destroy the electrostatic solitary structures.

Key words: electron phase-space hole; electrostatic solitary structure; particle simulation; electrostatic whistler wave

0 引言

在空间等离子体中,静电孤立结构是一种非常普遍的非线性物理现象,经常在磁尾、地球极区上空、太阳风、地球弓形激波附近和磁鞘中被卫星观测到^[1~4].这些波动沿着磁场方向传播,平行电场(电场在平行于磁场方向的分量)在沿着磁场方向呈双极结构.一般认为,这种静电孤立波和电子速度相空间中的空洞有关,即是 BGK (Bernstein-Greene-Kruskal) 模^[5,6].电子束流不稳定的一维粒子模拟也发现了这种和电子空洞有关的孤立结构,并发现了这种静电孤立结构的形成过程:先是一个几乎单色的静电波被激发,随后这个静电波的波形互相合并,最后形成一个或几个静电孤立结构^[7,8].而对二维等离子体中的静电孤立结构的研究表明,在磁场很弱的情况下($\Omega_e < \omega_b$, 其中 Ω_e 和 ω_b 分别为电子回旋频率和被孤立波捕获的电子的弹跳频率),孤立结构是不稳定的^[9].随着磁场的增强,当 $\omega_{pe} > \Omega_e > \omega_b$ (其中 ω_{pe} 为电子等离子体频率)时,静电孤立结构有着二维结构,在平行和垂直于磁场方向都是有界的^[10].而在 $\Omega_e > \omega_b$ 的强磁化等离子体中,静电孤立结构是一维的,即在平行于磁场方向是有界的,而在垂直于磁场方向是无界的.在这种情况下电子空洞可激发静电哨声波,并会破坏这些静电孤立结构^[11~13].

在本文中,我们通过二维粒子模拟方法研究了电子双流不稳定性激发静电波的非线性演化过程,发现在强磁化($\Omega_e = 2.0\omega_{pe}$)等离子体中,形成的静电孤立结构在静电哨声波被激发之前实际上是准一维的,即它们在垂直于磁场方向虽然是无界的,却是有结构的,而并非以前人们认为的那样是一维的,即在垂直于磁场方向没有结构.因而会形成和弱磁化($\Omega_e = 0.5\omega_{pe}$)等离子体中的二维静电孤立结构一样的垂直电场(电场在平行于磁场方向的分量)结构,即垂直电场在平行于磁场方向具有单极结构,这些结构已被很多卫星观测到.

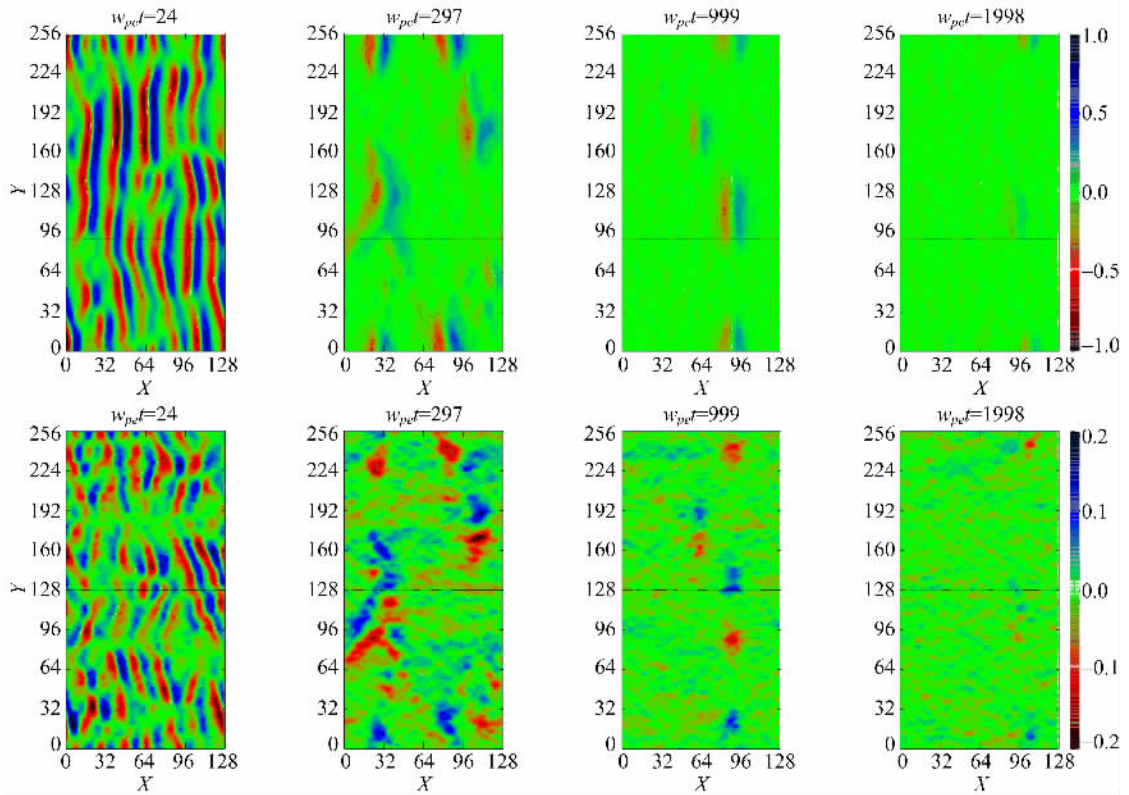
1 计算模型

在本文中我们应用一个二维的静电粒子模拟程

序来研究电子双流不稳定性激发静电波的非线性演化过程^[14].带电粒子在 x - y 平面上运动,背景磁场 B_0 沿着 x 方向.程序采用周期边界条件,即在一端的电场值和相对一端的相等,粒子如离开一端的边界,则在相对一端以相同的速度进入.在初始时刻,两种成分电子的密度和温度相等($n_{e1} = n_{e2}$, $T_{e1} = T_{e2} = T_e$),速度分布满足 Maxwell 分布.背景电子没有平均速度($V_x = 0$),另一束电子的平均速度 V_d 为电子热速度的 5 倍($V_x = 5v_{te}$, $v_{te} = \sqrt{kT_e/m_e}$ 为初始时刻的电子热速度).离子的速度同样也满足 Maxwell 分布,温度和电子的一样,但没有平均速度($V_x = 0$),离子和电子质量之比为 1 836 ($m_i/m_e = 1 836$).在模拟中,粒子的密度和速度分别用总的电子密度 $n_0 = n_i = n_{e1} + n_{e2}$ (n_i 是离子的密度)和电子的热速度无量纲化.空间和时间尺度分别用电子德拜长度 λ 和电子的等离子体频率的倒数 ω_{pe}^{-1} 量度,电场以 $m_e\omega_{pe}v_{te}/e$ 无量纲化.在模拟中采用 128×256 个网格点,网格距为 $\lambda_D \times \lambda_D$,时间步长是 $0.02\omega_{pe}^{-1}$,每一种成分的粒子(离子、背景电子、束流电子)数是 3 276 800.

2 计算结果

我们通过二维静电粒子模拟方法计算了弱磁化($\Omega_e = 0.5\omega_{pe}$)和强磁化($\Omega_e = 2.0\omega_{pe}$)等离子体中电子双流不稳定性激发静电波的非线性演化过程.图 1(a)和(b)分别是 $\Omega_e = 0.5\omega_{pe}$ 时不同时刻的平行电场 E_x 和垂直电场 E_y 的等值线图,和一维时的情形类似,先是几乎单色的静电波被激发起来.这些波的波长约为 $20\lambda_D$,这些波的色散关系近似满足 $\omega = \frac{1}{2}kV_d$ (ω 和 k 分别为波动的频率和波数).随着这些波的强度的增加,非线性的动力学效应开始显现.如 $\omega_{pe}t = 24$ 时的电场图所显示的,这些单色的静电波的相邻的波形开始合并,同时垂直电场也开始形成规则的结构.随着这些静电波的合并,同时在这种情况下被静电波捕获的电子弹跳频率和电子的回旋频率相当,静电波存在切向不稳定性,即静电孤立波沿着垂直磁场方向扭曲.两者共同作用的结果是形成二维结构的静电孤立结构,如 $\omega_{pe}t = 297$ 时的电场图



The dash lines indicate the y locations of the cut of the results shown in Fig. 2

图 1 $\Omega_e = 0.5\omega_{pe}$ 时不同时刻的平行电场 E_x (a) 和垂直电场 E_y (b) 的等值线图

Fig. 1 The electric field E_x (a) and E_y (b) at different times for $\Omega_e = 0.5\omega_{pe}$

所示,这种静电孤立结构在 x 和 y 两个方向都是有界的. 同时从图 2 我们可以发现,很明显的平行电场 E_x 在静电孤立结构处呈双极形分布,而垂直电场 E_y 则呈单极结构,这和 Umeda 等人^[10]的想法是一致的. 对应于这种二维静电孤立结构,电荷密度和电位在这个地方相应是一个正的极值. 这种二维的静电结构会随着时间的推移逐渐减弱,直至最后消失.

由图 3 可以发现,无论背景电子还是束流电子的 x 方向的速度 v_x 的相图在静电孤立结构处速度都呈空洞状分布,说明静电孤立结构是 BGK 模.

图 4(a)和(b)分别是 $\Omega_e = 2.0\omega_{pe}$ 时不同时刻的平行电场 E_x 和垂直电场 E_y 的等值线图,一开始的演化和弱磁化的 $\Omega_e = 0.5\omega_{pe}$ 的情形类似,但由于在这种情况下,由于被静电波捕获的电子弹跳频率小于电子的回旋频率,这些波动没有切向不稳定性,因而随着静电波动的合并,最后形成的是准一维的静电孤立结构,即在平行于背景磁场方向是有界,而在垂直于背景磁场方向是无界的. 但是与他人的不同的是,我们发现在垂直于背景磁场的方向上,无论是平行还是垂直电场都是有变化的. 如沿着平行于背

景磁场的方向切割静电孤立结构,在这孤立结构处,平行电场具有双极结构,而垂直电场是单极结构. 这可从图 5 中很容易发现. 但是这种静电孤立结构是不稳定的,它可激发几乎垂直于磁场方向的静电哨声波,关于静电哨声波的细节可参阅文献^[11]. 随着静电哨声波的强度的增加,这种静电孤立结构最后会消失. 同样由图 6 可见,无论背景电子还是束流电子的 x 方向的速度 v_x 的相图在静电孤立结构处都呈空洞状分布,静电孤立结构是 BGK 模.

3 结论

我们通过二维粒子模拟方法分别研究了强磁化 ($\Omega_e = 2.0\omega_{pe}$) 和弱磁化 ($\Omega_e = 0.5\omega_{pe}$) 等离子体中电子双流不稳定性激发静电波的非线性演化过程. 这两种情况在电子双流不稳定性的线性演化阶段是类似的,激发的准单色的静电波. 在非线性演化阶段,在强磁化等离子体中准单色的静电波会不断地合并,直至形成一个准一维的孤立静电结构(即它们在平行于磁场方向是有界的,而在垂直于磁场方向是无界的,却是有结构的),如沿着背景磁场方向切下该静电孤立结构,则可发现平行方向电场呈双极结

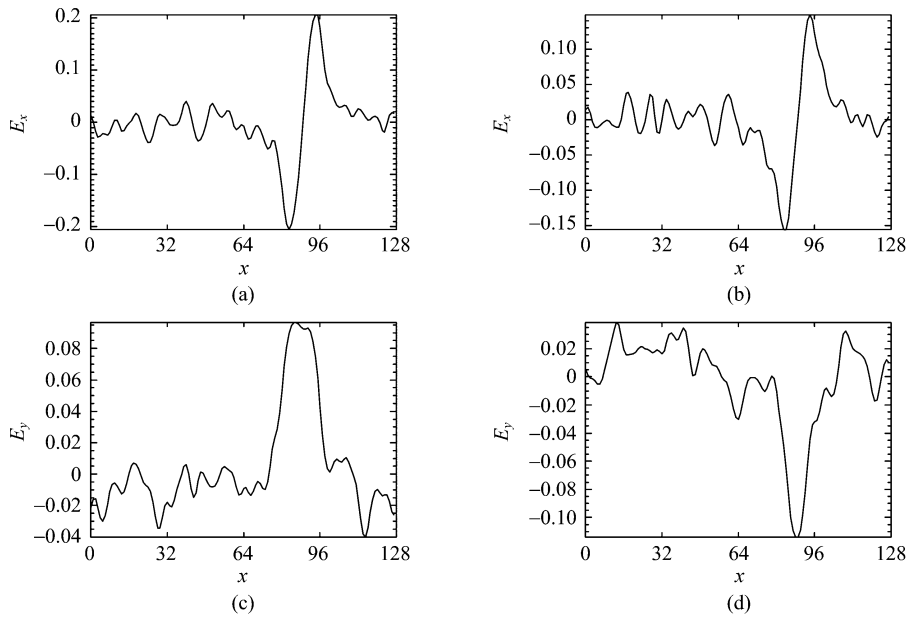
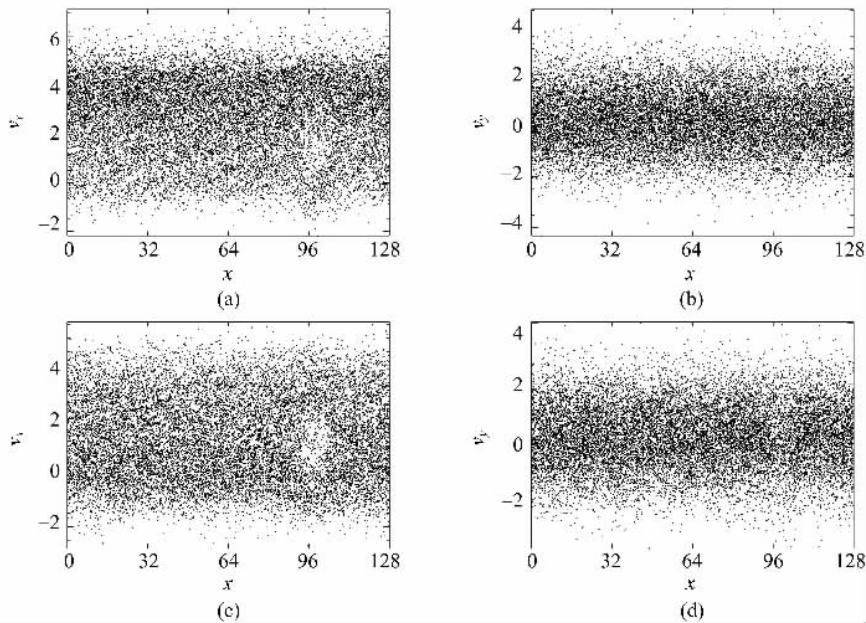


图 2 $\omega_{pe}t=999$ 时沿着 $y=90\lambda_D$ 相切后的平行电场 E_x (a) 和垂直电场 E_y (b) 及沿着 $y=128\lambda_D$ 相切后的平行电场 E_x (c) 和垂直电场 E_y (d) ($\Omega_e=0.5\omega_{pe}$)
 Fig. 2 E_x (a), E_y (b) along $y=90\lambda_D$, and E_x (c), E_y (d) along $y=128\lambda_D$ at $\omega_{pe}t=999$ ($\Omega_e=0.5\omega_{pe}$)



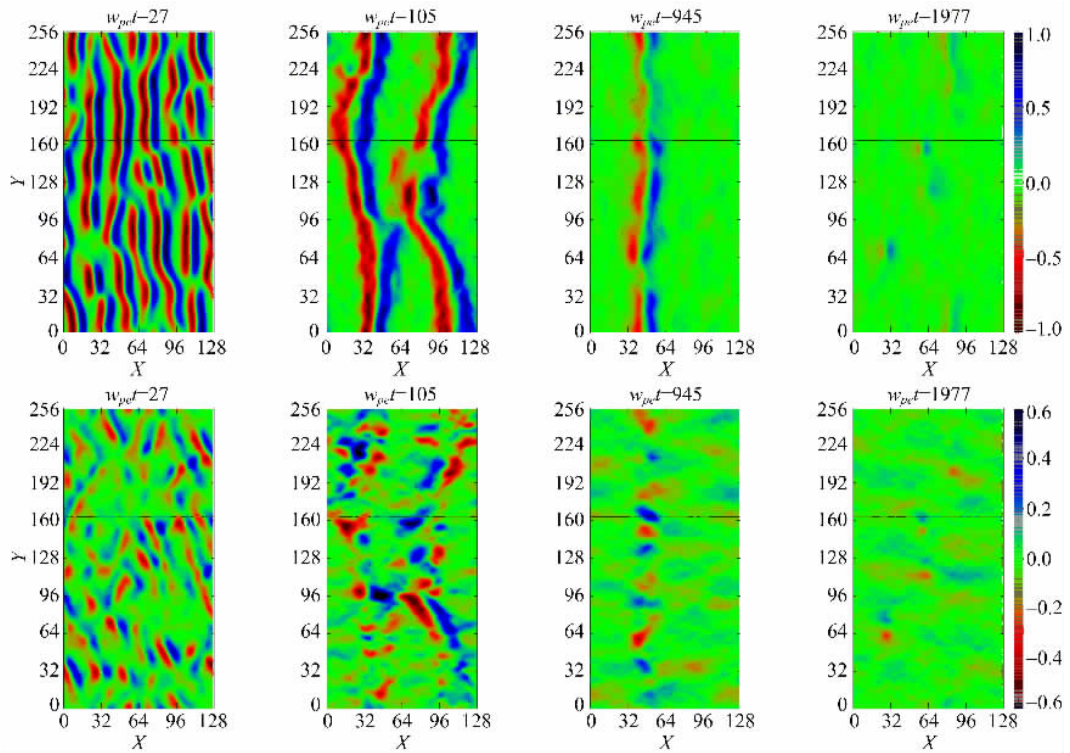
Only the electrons in region $126.5\lambda_D < y < 129.5\lambda_D$ are chosen

图 3 $\omega_{pe}t=1600$ 时在 $126.5\lambda_D < y < 129.5\lambda_D$ 范围内的束流电子的 x 方向的速度 v_x (a), 束流电子的 y 方向的速度 v_y (b), 背景电子的 x 方向的速度 v_x (c) 和背景电子的 y 方向的速度 v_y (d) 的相图 ($\Omega_e=0.5\omega_{pe}$)

Fig. 3 The phase diagrams of $x-v_x$ (a), $x-v_y$ (b) for beam electrons, and $x-v_x$ (c), $x-v_y$ (d) for background electrons at $\omega_{pe}t=1600$ ($\Omega_e=0.5\omega_{pe}$)

构,而垂直方向的电场呈单极结构,最后随着静电哨声波的激发,这种结构会慢慢消失.而在弱磁化等离子体中的电子双流不稳定性的非线性演化则有所不同,在准单色波不断合并形成孤立的静电结构的同

时,这些孤立结构会演化成在 x 和 y 方向上尺度都有限的二维结构,如沿着背景磁场方向切割该静电孤立结构,则可发现平行电场呈双极结构,而垂直电场呈单极结构.这种平行电场呈双极分布、垂直电场



The dash lines indicate the y locations of the cut of the results shown in Fig. 5

图 4 $\Omega_e = 2.0\omega_{pe}$ 时不同时刻的平行电场 E_x (a) 和垂直电场 E_y (b) 的等值线图

Fig. 4 The electric field E_x (a) and E_y (b) at different times for $\Omega_e = 2.0\omega_{pe}$

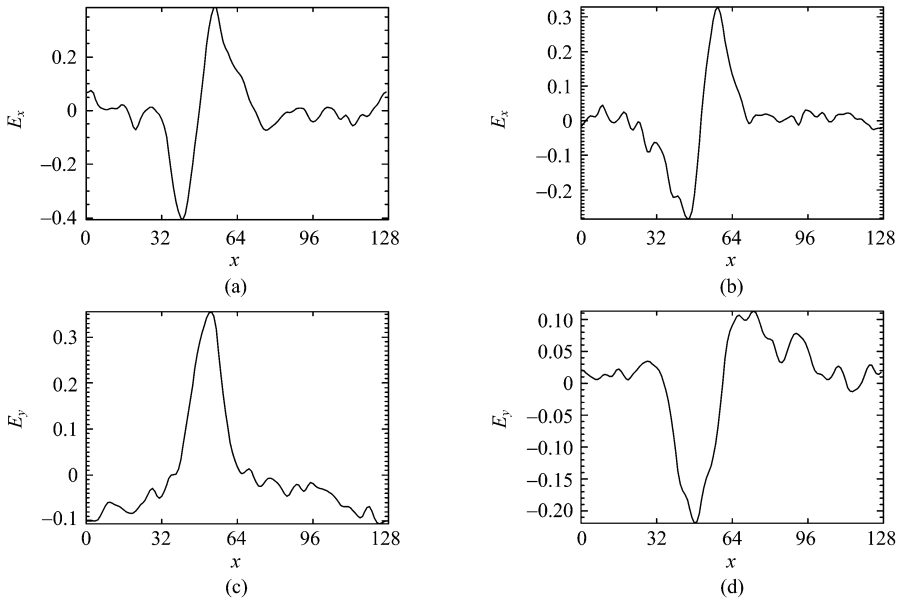


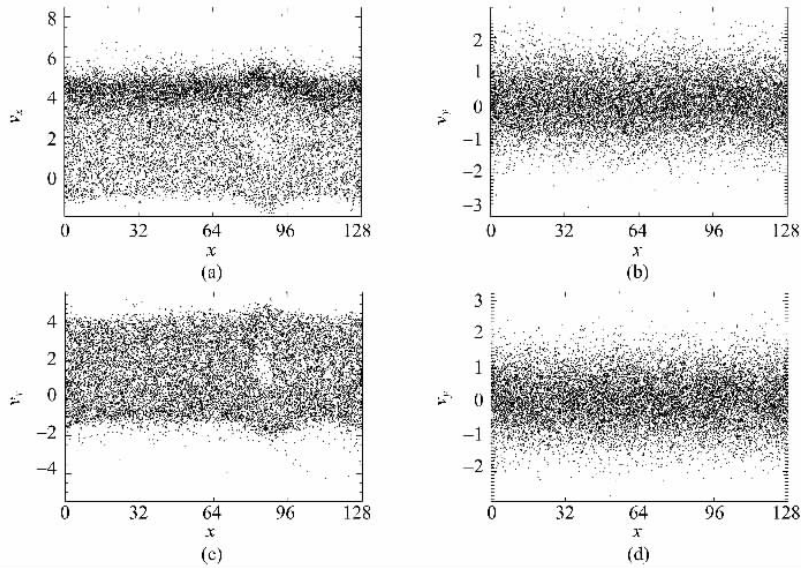
图 5 $\omega_{pe}t = 945$ 时沿着 $y = 150\lambda_D$ 相切后的平行电场 E_x (a) 和垂直电场 E_y (b) 及沿着 $y = 163\lambda_D$ 相切后的平行电场 E_x (c) 和垂直电场 E_y (d) 相切后的平行电场 E_x 和垂直电场 E_y ($\Omega_e = 2.0\omega_{pe}$)

Fig. 5 E_x (a), E_y (b) along $y = 150\lambda_D$, and E_x (c), E_y (d) along $y = 163\lambda_D$ at $\omega_{pe}t = 945$ ($\Omega_e = 2.0\omega_{pe}$)

呈单极分布的静电结构已被很多卫星观测到^[16~18], 我们的数值模拟结构很好的解释了这些观测现象, 同时我们发现这些结构对应于电子速度相空间中的空洞, 属于 BGK 模。

参考文献 (References)

[1] Matsumoto H, Kojima H, Miyatake T, et al. Electrostatic solitary waves (ESW) in the magnetotail: BEN wave forms observed by Geotail[J]. Geophys Res



Only the electrons in region $126.5\lambda_D < y < 129.5\lambda_D$ are chosen

图 6 $\omega_{pe}t=1\ 600$ 时在 $126.5\lambda_D < y < 129.5\lambda_D$ 范围内的束流电子的 x 方向的速度 v_x (a), 束流电子的 y 方向的速度 v_y (b), 背景电子的 x 方向的速度 v_x (c) 和背景电子的 y 方向的速度 v_y (d) 的相图 ($\Omega_e=2.0\omega_{pe}$)

Fig. 6 The phase diagrams of $x-v_x$ (a), $x-v_y$ (b) for beam electrons, and $x-v_x$ (c), $x-v_y$ (d) for background electrons at $\omega_{pe}t=1\ 600$ ($\Omega_e=2.0\omega_{pe}$)

Lett, 1994, 21:2 915-2 918.

- [2] Cattell C, Crumley J, Dombeck J, et al. Polar observations of solitary waves at the Earth's magnetopause[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29, 1065, doi:1029/2001GL014046.
- [3] Pickett J S, Chen L J, Kahler S W, et al. Isolated electrostatic structures observed throughout the cluster orbit; relationship to magnetic field strength [J]. Ann Geophys, 2004, 22;2 515-2 523.
- [4] Mangeney A, Salem C, Lacombe C, et al. WIND observations of coherent electrostatic waves in the solar wind [J]. Ann Geophys, 1999, 17;307-320.
- [5] Bernstein I B, Greene J M and Kruskal M D. Exact nonlinear plasma oscillations[J]. Phys Rev, 1957,108;546-550.
- [6] Berthomier M, Pottelette R, Muschietti L, et al. Scaling of 3D solitary waves observed by FAST and POLAR[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(22), 2148, doi:10.1029/2003GL018491.
- [7] Omura Y, Kojama H, Matsumoto H. Computer simulation of electrostatic solitary waves: a nonlinear model of broadband electrostatic noise [J]. Geophys Res, Lett, 1994, 21;2 923-2 926.
- [8] Lu Q M, Wang D Y, Wang S. Generation mechanism of electrostatic solitary waves in the Earth's auroral region[J]. J Geophys Res, 2005, 110, A03223, doi: 10.1029/2004JA010739.
- [9] Muschietti L, Roth I, Carlson C W, et al. Transverse instability of magnetized electron holes[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85;94-97.
- [10] Umeda T, Omura Y, Miyaka T, et al. Nonlinear evolution of the electron two-stream instability: Two-dimensional particle simulations[J]. J Geophys Res, 2006, 111, A10206, doi:10.1029/2006JA011762.
- [11] Goldman M V, Oppenheim M M, Newman D L. Nonlinear two-stream instabilities as an explanation for auroral bipolar wave structures[J]. Geophys Res Lett, 1999, 26;1 821-1 824.
- [12] Oppenheim M, Newman D L, Goldman M V. Evolution of electron phase-space holes in a 2D magnetized plasma [J]. Phys Rev Lett, 1999, 83;2 344-2 347.
- [13] Oppenheim M, Vetoulis G, Newman D L, et al. Evolution of electron phase-space holes in 3D [J]. Geophys Res Lett, 2001, 28;1 891-1 894.
- [14] Lu Q M, Cai D S. Implementation of parallel plasma particle-in-cell codes on PC cluster[J]. Comput Phys Commun, 2001, 135;93-104.
- [15] Ergun R E, Carlson C W, McFadden J P, et al. Debye-sclae plasma structures associated with magnetic-field-aligned electric fields [J]. Phys Rev Lett, 1998, 81;826-829.
- [16] Ergun R E, Carlson C W, McFadden J P, et al. Fast satellite observations of large-amplitude solitary structures [J]. Geophys Res Lett, 1998, 25;2 041-2 044.
- [17] Franz J R, Kintner P M, Pickett J S. POLAR observations of coherent electric field structures[J]. Geophys Res Lett, 1998, 25;1 277-1 280.
- [18] Franz J R, Kintner P M, Seyler C E, et al. On the perpendicular scale of electron phase-space holes[J]. Geophys Res Lett, 2000, 27;169-172.