科学通报
第41卷 第13期 CHINESE SCIENCE BULLETIN 1996年7月

碰撞等离子体中大振幅离子声波的非线性效应*

王文清 夏蒙棼
(北京大学地球物理系,北京 100871) (北京大学物理系,北京 100871)

关键词 非线性效应 阈值 捕获区 过渡区

等离子体波振幅足够大时,相干性和非线性效应将起重要作用,不能简单地采用准线性理论. 一些电子被波的势阱俘获后,由于波与粒子相互作用,在相速度 $V_\Phi \sim \omega/k$ 附近分布函数将大大畸变,必须用非线性理论来处理. Hasegawa[1]在讨论大振幅等离子体波非线性效应问题时,他假设电子分布函数在捕获区变平,在非捕获区保持平衡分布. Krapcher 等[2]由绝热不变量理论讨论大振幅波驱动电流的问题,但讨论限于一维情形,并且未包括耗散效应的影响. 夏蒙棼[3]分析了一种随机效应驱动电流的机制,得到斜波振幅要超过某个随机性阈值时才出现这种机制. 但对碰撞对捕获电子非线性效应的影响,或耗散效应的研究在国内外都较少讨论. 我们利用离子声波漂移不稳定性[4]使离子声波的振幅增长到足够大时也得到了离子声波非线性朗道阻尼的理论与实验相符合的结果[5,6].

本文将进一步讨论稳定有限振幅相干波的某些捕获电子非线性效应,研究离子声波产生非线性效应所需波振幅阈值大小、捕获区半宽度以及由于碰撞所引起的耗散效应,即过渡区宽度问题. 在此基础上与大振幅离子声波的实验结果比较,发现理论与实验结果是符合的.

1 理论

在无耗散情形,无磁场等离子体中或沿磁场方向传播的静电波振幅足够大时,伴随着捕获粒子的弹跳过程(bounce),分布函数在捕获区发生周期性变化,波与粒子间将发生周期性的能量交换,使波的振幅也出现以 $f_{b0} = \frac{k}{2\pi}\left(\frac{e\Phi_0}{m}\right)^{1/2}$ 为特征频率的周期性变化[5]. 在速度空间中,无碰撞捕获区的平均半宽度为 $\Delta V = \left(\frac{2e\Phi_0}{m}\right)^{1/2}$,以电子热速度 $V_e = \left(\frac{2T_e}{m}\right)^{1/2}$ 约化后则为

$$\Delta U = \frac{\Delta V}{V_e} = \left(\frac{e\Phi_0}{T_e}\right)^{1/2}. \tag{1}$$

在捕获区与非捕获区的分界附近,电子的运动是不稳定的. 由于碰撞的影响,在捕获区与非捕获区之间将形成一个过渡区. 过渡区电子在速度空间中的一定区域作随机性运动. 过渡区出现在 $V = \frac{\omega}{k} \pm \Delta V$ 附近,由碰撞而形成的过渡区的宽度为

1995-05-29 收稿,1996-02-02 收修改稿
* 国家自然科学基金资助项目

$$\delta U=\frac{\delta V}{V_e}=2^{3/4}\pi^{1/2}\left(\frac{\nu_e}{kV_e}\right)^{1/2}\left(\frac{e\Phi_o}{T_e}\right)^{\frac{1}{4}},\tag{2}$$

其中 $\nu_e=\nu_{en}+\nu_{ei}$ 为电子-中性粒子及离子的碰撞频率，显著弹跳运动出现条件为 $\frac{\delta U}{\Delta U}=\frac{\delta V}{\Delta V}\ll 1$，即过渡区远小于捕获区. 令 $\frac{\delta V}{\Delta V}=1$，可定出非线性振荡出现的阈值 Φ_{OC} 为

$$\frac{e\Phi_{OC}}{T_e}=\left(\frac{2\sqrt{2}\pi\nu_e}{kV_e}\right)^{2/3}.\tag{3}$$

过渡电子与波的耦合是无规的，因而将在波的驱动下在速度空间中作随机扩散，这可导致捕获区与非捕获区之间的粒子输运，从而改变分布函数的捕获区平台及高能尾部的高度.

2 实验装置、条件及实验结果

实验在一种双等离子体装置中[4]进行，它是由两个 Ø400 mm×700 mm 不锈钢圆柱真空容器对接而成. 调整偏置电压，使一个等离子体室 A 的空间电位稍高于另一个等离子体室 B，在 $e\Delta V_{AB}=\frac{1}{2}mV_d^2\leqslant\frac{1}{3}T_d$[4] 时产生所谓慢电子漂移(这里 V_d 为电子漂移速度). 在我们的实验条件下，得到 $\Delta V_{AB}=0.1\sim0.5$ V，相应地 $V_d=(0.42\sim2.1)\times10^7$ cm/s. 在 $V_d>V_\Phi>V_i$ 条件下(V_Φ 为离子声波相速度，V_i 为离子热运动速度)电子分布函数在离子声波相速 $V_\Phi=\frac{\omega}{k}$ 附近就会有正的斜率，即 $f_e'>0$. 由于离子声波漂移不稳定性使激发的离子声波可以增长，直至振幅达到足够大，并超过相应的阈值 Φ_{OC} 时出现非线性现象.

典型的实验条件为：氩气压强 $P=2.67\times10^{-2}$ Pa、氩等离子体浓度 $N_e=5\times10^8$ cm^{-3}，电子温度 $T_e=1$ eV，离子温度 $T_e/T_i=15$，电子-中性粒子及离子碰撞频率 $\nu_e=10^5$ s^{-1}，相应的电子热速度 V_e 和离子热速度 V_i 则分别为：$V_e=4.2\times10^7$ cm/s，$V_i=4.0\times10^4$ cm/s.

由文献[5]或[6]可以看到，靠近栅极激发之很小振幅离子声波迅速增长，当振幅达到一定时，离子声波之振幅开始出现典型的周期性起伏振荡的非线性现象. 测出离子声波波长 λ，利用已知的波激发频率 f 可以方便地计算出离子声波的相速度 $V_\Phi=\lambda\cdot f$，对离子声波相速度和群速度的实验测量以及根据电子温度 T_e 计算的结果均为：$V_\Phi=1.3\times10^5$ cm/s. 文献[5]中，我们已经证明此测得之色散关系为典型的离子声波色散关系.

实验激发离子声波的频率范围 $f=8\times10^4\sim2\times10^5$ Hz，但有明显非线性效应的频率范围为 $f=(1.2\sim2.0)\times10^5$ Hz，测得相应的 $k=5.1\sim12.6$ cm^{-1}. 实验中我们将 RF 探针偏置在探针饱和电子电流的地方，通过观测探针收集的电子电流的扰动 I_e' 来研究离子声波传播. 而探针电子电流扰动 I_e' 正比于电子浓度的扰动 N_e'，也是正比于离子声波振幅之大小 Φ_o. 在实验中测量到 $(e\Phi_o/T_e)=0.1$，则实验中一般离子声波的振幅 $\Phi_o=100$ mV.

3 结果分析

3.1 阈值的估计

将实验得到的 ν_e，k 以及 V_e 代入(3)式中，则可计算出离子声波非线性振荡的阈值 $\Phi_{OC}=14\sim25.5$ mV(相应于 $k=5.1\sim12.6$ cm^{-1}). 可见，实验激发的离子声波的振幅 Φ_o(大约为

100 mV)大于根据理论计算出来的阈值 Φ_{OC},这也正是我们在 $f=(1.2\sim2.0)\times10^5$ Hz 频率范围内能成功地观测到离子声波非线性效应的根本原因.

3.2 捕获区半宽度及过渡区宽度估计

根据上面得到的 Φ_o 及 T_e,由(1)式可以得到捕获区半宽度 $\Delta U=0.316$ 或 $\Delta V=1.3\times10^7$ cm/s. 类似,将实验得到的 Φ_o 和 T_e, ν_e, V_e 以及波数 k 代入到(2)式中,可以得到过渡区宽度 $\delta U=0.005\sim0.013$,或 $\delta V=(2.2\sim5.5)\times10^5$ cm/s. 因为 $\delta U/\Delta U=(1.7\sim4.2)\times10^{-2}\ll1$,可见,在我们的实验条件下,由于碰撞所引起的耗散效应远小于由于捕获电子而造成的非线性效应,这也是我们能观测到明显离子声波非线性效应的另一重要原因.

4 结论

归纳以上计算及实验测量结果如下: $V_i=4.0\times10^4$ cm/s(离子热速度), $\Delta V=1.3\times10^7$ cm/s(捕获区半宽度), $V_\Phi=1.3\times10^5$ cm/s(离子声波相速度), $\delta V=(2.2\sim5.5)\times10^5$ cm/s(过渡区宽度), $V_d=(0.42\sim2.1)\times10^7$ cm/s(电子漂移速度), $\Phi_{OC}=14\sim25.5$ mV(波振幅阈值), $V_e=4.2\times10^7$ cm/s(电子热速度), $\Phi_o=100$ mV(实验平均波振幅).

$V_e\gg V_\Phi\gg V_i$,正是离子声波可以被激发和传播的条件,在此条件下离子的朗道阻尼非常小. 由于漂移电子,使电子分布函数 f_e 相对于离子分布函数 f_i 有一漂移速度 V_d,正因为满足关系 $V_d>V_\Phi>V_i$,则造成离子声波相速度 V_Φ 处有 $f'_e>0$,并产生离子声波漂移不稳定性. 当离子声波之振幅 Φ_o 增长到阈值 Φ_{OC}(14～25.5 mV)以上时,就会产生非线性效应,部分电子被波的位势阱所捕获. 在实验中 $\Phi_o=100$ mV,可以满足 $\Phi_o>\Phi_{OC}$条件,这也正是产生离子声波非线性效应的条件. 在我们的实验条件下,捕获区之半宽度 $\Delta V=1.3\times10^7$ cm/s,而由碰撞产生的过渡区宽度 $\delta V=(2.2\sim5.5)\times10^5$ cm/s. 由于 $\delta V/\Delta V=10^{-2}\ll1$,则非线性效应才能持续相当长的时间. 当波振幅下降(衰减)到阈值 Φ_{OC}以下时($\delta V\geqslant\Delta V$),则全部捕获电子都变成了过渡区电子,非线性效应也就消失. 以上也正是我们实验结果所呈现的全部离子声波发展过程. 理论与实验结果基本吻合,说明我们的理论和实验是可靠的.

致谢　对濮祖荫教授对完成本文所作的非常有益的帮助,作者表示感谢.

参　考　文　献

1 Hasegawa A. Plasma Instabilities and Non-linear Effects. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1975

2 Krapchev V B, Ram A K. Adiabatic theory of current generation by non-linear waves in a Vlasov plasma. Nucl Fusion, 1980, 20(12): 1 533～1 541

3 夏蒙棼. 随机驱动等离子体电流. 物理学报, 1983, 32(3): 338～345

4 王文清. 离子声波漂移不稳定性的实验研究. 科学通报, 1995, 40(19): 1 820～1 821

5 Wang W Q. Experimental research on nonlinear Landau damping of ion acoustic waves. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(24): 2 035～2 039

6 Wang W Q. A theoretical and experimental research on nonlinear effects of large-amplitude ion acoustic wave. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(13): 1 102～1 105