

空间尘埃的充电过程及与 等离子体参数的关系^{*}

李嘉巍 李中元

(中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026)

摘 要

考虑了地球附近的彗星、行星环、行星际介质等空间尘埃等离子体环境中尘埃颗粒的充电问题. 应用典型的尘埃等离子体参数, 计算了不同种类的尘埃颗粒, 以及不同等离子体成分下等离子体中尘粒的平衡电势, 得到了尘埃颗粒的平衡电势与尘埃等离子体成分、温度, 及其他等离子体参数之间的相互关系.

关键词 空间等离子体; 尘埃充电; 彗星; 行星磁层; 行星环; 行星际介质

1 引言

尘埃等离子体是参杂有尘埃颗粒的电离气体, 它广泛存在于星际云、行星环、行星磁层、彗星大气、行星际介质等空间环境中. 沉浸在等离子体环境中的尘埃颗粒会被充电, 带电尘粒的运动会受到电磁场的作用. 同时, 带电尘粒会与电磁场耦合, 并作为一种新的等离子体组份加入到等离子体的集体中, 产生许多宏观效应, 对等离子体自身的性质产生影响, 如等离子体波动和不稳定性等. 对于尘埃颗粒充电过程的研究, 会对解释彗尾的形成, 行星环结构及行星际介质的特性等一系列空间现象有重要意义^{[1]~[3]}. 在等离子体中, 若尘埃物体的表面电子发射过程不太重要, 平衡电势一般为负值, 因为当等离子体电子与离子互为热平衡时, 流至中性尘埃表面的电子通量要大于离子通量^[4]. Horanyi 和 Goertz^[5] 引入了等离子体温度波动, 得到了带相反极性电荷的尘粒. Bringol 和 Hyde^{[6]~[8]} 假定尘粒半径为特定分布, 也使尘粒的平衡电势为相反极性. 陈耀等^[9] 讨论了尘粒平衡电势与电子密度的相关性. 本文主要讨论地球附近的尘埃等离子体环境中, 尘粒的平衡电势与等离子体温度等参数的关系.

2 充电机制的分析

沉浸在等离子体环境中的尘埃颗粒会被充电, 有很多种充电机制可以使尘埃颗粒带电. 在本文所考虑的地球附近的彗星及离开太阳 1 个到几个 AU 的彗星、行星环、行星际介质等空间尘埃等离子体环境中, 起主要作用的充电电流是由尘粒与等离子体粒子间的

^{*} 国家自然科学基金项目资助 (10173010, 40390150)

2003-12-10 收到原稿, 2004-06-05 收到修定稿

相互作用引起的. 它们是电子附着电流、离子附着电流和由入射电子引起的二次电子发射电流.

考虑热平衡等离子体, $n_e = n_i = n$, $T_e = T_i = T$. 电子附着电流的表达式可采用^[4]:

$$J_{\text{THE}} = -a^2 en(8\pi T/m_e)^{1/2} \exp(eU/T)(1 - K_{\text{RP}}).$$

离子附着电流为^[8]

$$J_{\text{THi}} = a^2 Zen(8\pi T/m_i)^{1/2} \exp(-ZeU/T)(1 - K_{\text{RP}}).$$

其中, a , U 分别为尘粒的半径和表面电势; n , m , T 为等离子体的数密度、质量和温度; e 为电子电量; Z 为离子所带单位电荷数; K_{RP} 为等离子体粒子穿过尘粒的概率.

由入射电子引起的二次电子电流应该为^{[9],[10]}

$$J_{\text{SE}} = -3.70\delta_m J_{\text{THE}} F_5(0.25E_m/T)B(U, T_{\text{SE}}).$$

其中, δ_m 为最大二次电子产生率, E_m 为相应的入射电子能量, T_{SE} 为二次电子的温度, $B(U, T_{\text{SE}})$ 表示电子离开带电尘粒的概率,

$$B(U, T_{\text{SE}}) = \begin{cases} (1 + U/T_{\text{SE}}) \exp(-U/T_{\text{SE}}), & U > 0; \\ 1, & U < 0. \end{cases}$$

$$F_5(x) = x^2 \int_0^\infty t^5 \exp(-xt^2 - t) dt.$$

当各种充电电流达到平衡时, 尘埃颗粒的表面电势具有相对固定的值, 就是尘粒的平衡电势, 下列的方程式应该被满足:

$$\sum_i J_i = J_{\text{THE}} + J_{\text{THi}} + J_{\text{SE}} = 0.$$

3 计算结果及讨论

考虑 Si 和 C 两种尘埃颗粒成分在 H_2O^+ 和 H^+ 等离子体环境中的充电过程. 等离子体参数 $n = 100 \text{ cm}^{-3}$, $T = 10^4 - 10^6 \text{ K}$. 对于一般的等离子体彗星, 及某些行星环、行星际介质等空间尘埃等离子体环境, 这样的参数具有一定的普遍意义^[10]. 表 1 给出了尘粒参数^[9].

表 1 尘粒参数

Table 1 Dust Parameters

	δ_m	E_m/eV	K_{RP}
Si	2.4	400	0.02
C	1.0	250	0.02

通过计算, 可以得到尘埃颗粒的平衡电势与等离子体温度之间的相互关系. 图 1 是 Si 尘粒在 H_2O^+ 等离子体环境中的平衡电势, 图 2 是 Si 尘粒在 H^+ 等离子体环境中的平衡电势. 从图中可以看出, 当温度较低时平衡电势为负值, 且随等离子体温度的上升而下降, 到达某一特定温度时, 平衡电势会产生从负到正的跃变. 比较图 1 与图 2, 可以得到

图 3, 图中实线代表 H_2O^+ 等离子体的情况, 虚线表示 H^+ 等离子体的情况. 从图3中可以看出, H^+ 等离子体环境中, 尘粒的平衡电势高于 H_2O^+ 等离子体环境中尘粒的平衡电势.

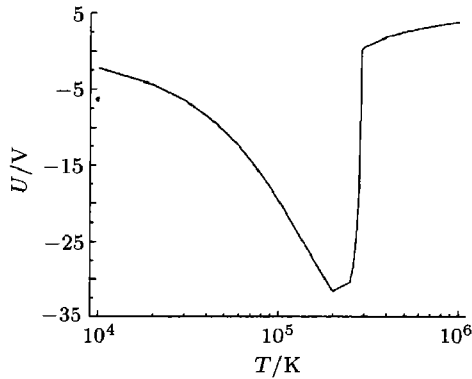


图 1 Si 尘粒在 H_2O^+ 等离子体中平衡电势与等离子体温度之间的关系曲线

Fig.1 The relationship between equilibrium potentials and plasma temperatures of Si grains in H_2O^+ plasma

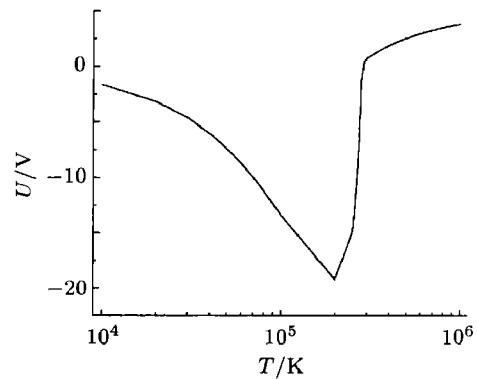


图 2 Si 尘粒在 H^+ 等离子体中平衡电势与等离子体温度之间的关系曲线

Fig.2 The relationship between equilibrium potentials and plasma temperatures of Si grains in H^+ plasma

图 4 是 C 尘粒在 H_2O^+ 等离子体环境中的平衡电势, 图 5 是 C 尘粒在 H^+ 等离子体环境中的平衡电势. 从图中可以看出, 尘粒的平衡电势也为负值, 且随着等离子体温度的升高而降低. 很明显, C 尘粒的平衡电势比 Si 尘粒的平衡电势要低, 而且在我们所考虑的范围内一直下降, 并没有达到正值. 同样将两张图比较, 从图 6 中可以看出, H^+ 等离子体环境中 C 尘粒的平衡电势比在 H_2O^+ 等离子体环境中要高.

通过以上的计算结果可以看出, 尘埃颗粒的平衡电势与等离子体温度密切相关. 在一定温度范围内, 尘粒的平衡电势为负值, 并随等离子体温度的升高而降低, 这是由于电子的热运动速度远大于离子的热运动速度, 因此尘粒会吸收更多的电子, 从而达到负的平

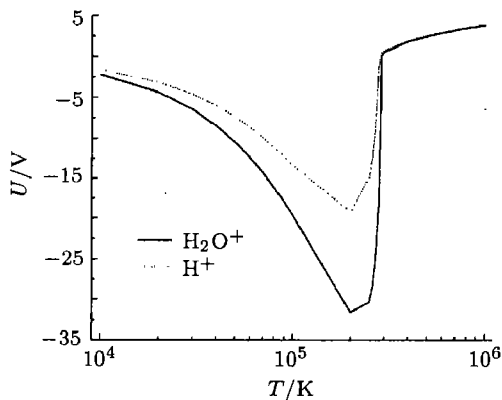


图 3 Si 尘粒在 H_2O^+ 和 H^+ 等离子体中平衡电势与等离子体温度之间的关系曲线

Fig.3 The relationship between equilibrium potentials and plasma temperatures of Si grains in H_2O^+ and H^+ plasma

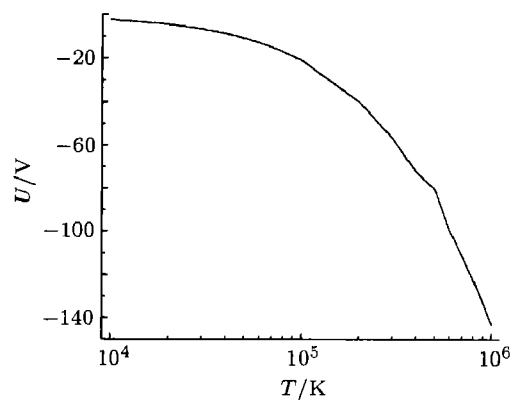


图 4 C 尘粒在 H_2O^+ 等离子体中平衡电势与等离子体温度之间的关系曲线

Fig.4 The relationship between equilibrium potentials and plasma temperatures of C grain in H_2O^+ plasma

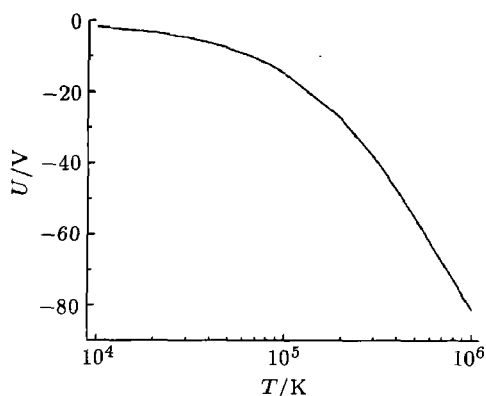


图5 C 尘粒在 H^+ 等离子体中平衡电势与等离子体温度之间的关系曲线

Fig.5 The relationship between equilibrium potentials and plasma temperatures of C grain in H^+ plasma

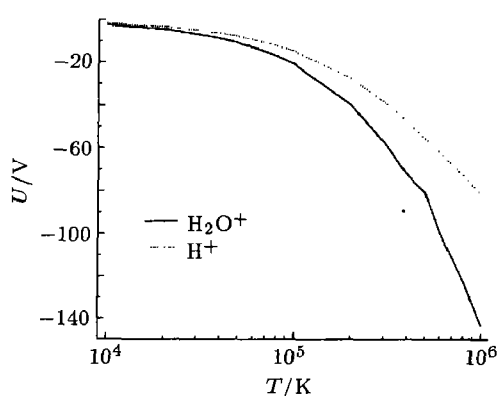


图6 C 尘粒在 H_2O^+ 和 H^+ 等离子体中平衡电势与等离子体温度之间的关系曲线

Fig.6 The relationship between equilibrium potentials and plasma temperatures of C grain in H_2O^+ and H^+ plasma

平衡电势. 当达到某一特定温度时, 尘粒的平衡电势会产生从负到正的跃变. 不同材质的尘埃颗粒, 平衡电势是不一样的, C 尘粒的平衡电势比 Si 尘粒的平衡电势低. 对于 Si 尘粒, 当温度升高到一定值时 ($\sim 10^5$ K 量级), 尘粒的表面电势可为正值, 这与 Bringol 和 Hyde^[6] 得到的一定温度时, 尘粒电荷会从负值变为正值, 基本上相吻合. 达到正的平衡电势的原因是, 随着入射电子能量的增强, 二次电子的产生率大大增加, 有更多的电子被发射出去, 从而达到正的平衡电势. 对于 C 尘粒, 在我们所考虑的温度范围内, 平衡电势一直是负的, 产生这种现象的原因在于 C 尘粒的二次电子产生率较小, 不足以与电子附着电流相比. 不同的等离子体成分对尘粒的平衡电势也有影响, C 尘粒和 Si 尘粒在 H^+ 等离子体中的平衡电势都比各自在 H_2O^+ 等离子体中的平衡电势高.

我们过去已经通过计算分析过平衡电势与电子密度的关系^[9]. 图7是针对 Halley 彗星中 Si 尘埃的计算结果, 很具有典型性, 平衡电势和电子密度具有很强的相关性. 现在, 我们又对平衡电势和温度的关系进行专门的讨论, 这样就会使人们对尘埃充电特性有更进一步的了解.

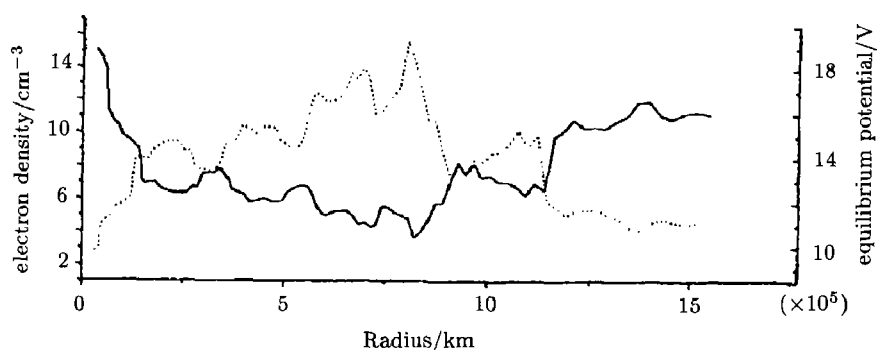


图7 Halley 彗星中 Si 尘粒平衡电势 (实线) 和电子密度 (虚线) 的关系

Fig.7 Equilibrium potential of silicate materials (solid line) in Comet Halley and the electron density (dashed line) at different distance R from P/Halley

参 考 文 献

- [1] Goertz C K, Morfill G. A model for the formation of spokes in Saturn's ring. *Icarus*, 1983, **53**:219—229
- [2] De Angelis U. The physics of dusty plasmas. *Physica Scripta*, 1992, **45**:465—474
- [3] Rosenberg M, Shukla P K. Gradient-drift instability in space dusty plasmas. *Planet. Space Sci.*, 2003, **51**:1—7
- [4] Whipple E C. Potentials of surface in space. *Rep. Prog. Phys.*, 1981, **44**:1197—1250
- [5] Horanyi M, Goertz C K. Coagulation of dust particles in a plasmas. *Astrophys. J.*, 1990, **361**:155—161
- [6] Bringol-Barge L, Hyde T W. Charging in a dusty plasma. *Adv. Space Res.*, 1997, **20**(8):1539—1542
- [7] Bringol-Barge L, Hyde T W. The calculation of grain charge in a dense dusty plasma with a nonuniform surface potential. *Adv. Space Res.*, 2002, **29**(9):1277—1282
- [8] Bringol-Barge L, Hyde T W. Charging in a dusty plasma with a size distribution: a comparison of three models. *Adv. Space Res.*, 2002, **29**(9):1283—1288
- [9] Chen Yao, Li Zhongyuan *et al.* Study on the charging characteristics and equilibrium potential of dust grains in comets. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(5):329—333. in Chinses (陈耀, 李中元等. 彗星中尘埃的带电特性和平衡电势的研究. 空间科学学报, 2003, **23**(5):329—333)
- [10] Li Zhongyuan. A research in the space dust dynamics. *Prog. Astron.*, 2001, **19**(2):161—166. in Chinese (李中元. 空间尘埃动力学的研究方向. 天文学进展, 2001, **19**(2):161—166)

CHARGING PROCESS OF SPACE DUST AND ITS DEPENDENCE UPON PLASMA PARAMETERS

LI Jiawei LI Zhongyuan

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

Abstract

Dust grains immersed in plasma will be charged of various charging currents, this paper considers three main currents due to the relative velocity between the dust grains and the plasma: the primary ions, the primary electrons, and the secondary electrons. The surface potentials of silicate and carbon dusts grains in H^+ and H_2O^+ plasma environments are calculated using universal plasma parameters, these plasma conditions are common in space environments, such as comets, planetary rings, and interplanetary media. A conclusion is found that the equilibrium potential of dust grains have close correlation with the plasma temperature. At low temperatures, the surface potential will become lower while the temperature rises. The dust can reach a positive potential when the temperature is high enough. The potential of carbon grains is lower than that of silicate grains. The component of plasma may affect the potential, too. For both silicate and carbon grains, potential in H^+ plasma is higher than that in H_2O^+ plasma.

Key words Space plasma, Dust charge, Comet, Planetary magnetosphere, planetary rings, Interplanetary medium