

空间尘埃动力学的研究动向

李 中 元

(中国科学技术大学地球和空间科学系 合肥 230026)

摘 要

讨论了空间尘埃动力学的特性,特别是空间尘埃等离子体的充电、波动和不稳定性现象以及它们在太阳系中的一系列表现。

关键词 空间尘埃等离子体 — 彗星 — 行星际介质 — 行星磁层

分类号 185.9

太阳系中的尘埃物质,大多以尘埃等离子体的形式存在,它是尘粒、电子、离子和中性气体分子的混合物。在星际云、行星环、行星磁层、彗星大气、黄道光等空间环境中都存在着尘埃等离子体。早期太阳星云的演化很可能经历过尘埃等离子体状态。尘埃等离子体早期的研究工作主要考虑的是等离子体中孤立尘粒的有关物理过程,最近几年的研究工作考虑了尘埃等离子体中的波动及其不稳定性等集体现象,带电尘埃的存在会对等离子体的电中性、各种波动及其稳定性产生影响,带电尘埃作为一种新的等离子体组分,自身也会产生一些集体运动。运用尘埃等离子体模型,目前已经对许多太阳系中的现象作出了合理的解释。

1 尘埃带电问题的讨论

普遍存在于尘埃等离子体中的充电机制是等离子体粒子在尘埃表面的附着沉积。入射于尘埃表面的电子流 J_e 和离子流 J_i 与尘埃的表面电势 Φ_s 有关,也与等离子体和尘粒之间的相对速度 W 有关。 J_e 和 J_i 可写为^[1]

$$J_e = \begin{cases} J_{oe} \exp(e\Phi_s/T_e), & (\Phi_s < 0); \\ J_{oe}(1 + e\Phi_s/T_e), & (\Phi_s > 0). \end{cases}$$
$$J_i = \begin{cases} J_{oi} \exp(-Z_i e\Phi_s/T_i), & (\Phi_s > 0); \\ J_{oi}(1 - Z_i e\Phi_s/kT_i), & (\Phi_s < 0). \end{cases}$$

如果入射电子能量足够大, 还会在尘粒表面引发二次电子。二次电子产生率 δ 与入射电子能量 E 的关系为:

$$\delta(E) = 7.4\delta_{\max}(E/E_{\max}) \cdot \exp \left[-2(E/E_{\max})^{1/2} \right],$$

E_{\max} 是与最大二次电子产生率 δ_{\max} 对应的入射能量。尘粒受太阳紫外辐照也会释放光电子, 发射的光电子一般为麦氏分布。光电子流 J_p 取决于尘粒物质的光电发射效率和尘粒表面电势, 可表示为 [1]:

$$J_p = \begin{cases} \pi a^2 \kappa, & (\Phi_s \leq 0); \\ \pi a^2 \kappa \exp(-e\Phi_s/T_p), & (\Phi_s > 0). \end{cases}$$

其中 $\kappa \equiv 2.5 \times 10^{14} \eta D^{-2}$, 是离太阳为 D [A.U.] 处的光电子通量, η 是光电发射效率。此外还有其他几种充电电流, 其产生机制分别为: 热发射、场致发射、溅射、离子引起的二次电子发射等。电量为 Q 的尘埃的表面电场 $E_s = Q/(4\pi\epsilon_0 a^2)$ 正比于 Φ_s/a , 当尘粒的表面电场超过一定的临界值时, 便会发生场致发射或静电爆裂 [2]。静电张力引起的尘粒爆裂会将尘粒粗糙表面的隆起部分剥落, 使尘粒更趋球形。

若 Q 为负时, 尘粒周围的离子密度 n_i 会略高于电子密度 n_e , 正电性的空间电荷使得尘粒附近的电场偏离平方反比律而以指数形式衰减, 指数衰减的空间尺度是德拜长度 $\lambda_D = [\epsilon_0 k T_e / (n_e e^2)]^{1/2}$ 。球形尘粒在等离子体中的电容值 C 为: $C = 4\pi\epsilon_0 a \exp(-a/\lambda_D)$, 尘粒电荷与表面电势的关系为 $Q = C\Phi_s$ 。

表 1 空间环境中各种尘埃等离子体的相对尺度 [4]

基本尺度比	星际云	电离层	彗星	行星环	磁层
a/λ_D	10^{-8}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-4}
d/λ_D	10^{-1}	10^{-2}	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	10^{-3}	$10^{-1} \sim 10^{-2}$

表 2 行星环尘埃等离子体的各种 P 值 [5]

行星环名称	电子密度 n_e/m^{-3}	电子温度 T_e/eV	尘粒半径 a/m	尘埃数密度 n_d/m^{-3}	P
土星 A 环	10^5	2	5	2.5×10^{-2}	3×10^{-8}
土星 B 环	10^5	2	1	6.3×10^{-1}	2×10^{-7}
土星 F 环	10^7	10^2	10^{-2}	0.32	3×10^{-8}
	10^7	10^2	10^{-6}	3.3×10^7	3×10^{-4}
土星环	10^5	2	10^{-6}	10^6	2×10^{-5}
轮辐结构	10^8	2	10^{-6}	10^6	2×10^{-8}
天王星 α 环	5×10^7	30	5×10^{-2}	0.446	10^{-8}
天王星 ϵ 环	2×10^8	30	0.2	0.14	4×10^{-9}
木星环	10^8	10^2	2×10^{-6}	26.5	3×10^{-10}
土星 G 环	10^7	10^2	3×10^{-4}	3.5×10^{-3}	10^{-11}

在温度有起伏变化的等离子体中, 可能会有一些尘粒带正电, 而另一些带负电。在温度较低的等离子体中, 尘粒都是带负电的, 当温度增加时, 尘粒的平衡电荷应该可以变为正值。任何尘粒表面的电势, 都会包含有德拜球内其它尘粒电荷的贡献, 因此每个尘粒上的平均电荷量会比单个孤立尘粒上的电荷值小。设尘粒数密度为 n_d , 则等离子体本底电势 V_p 、尘粒电荷 Q 及其浮动电位 $U = \phi_s - V_p$ 由参数 $P = an_d T_e / n_e$ 决定^[3]。表 1 列出了不同空间环境中的尘埃等离子体的基本尺度的相对大小^[4], 其中 d 为尘粒的平均间距, a 为尘粒的平均半径。表 2 为各种行星环尘埃等离子体的 P 值大小^[5]。

2 空间环境中带电尘粒的运动特性

相对于等离子体以速度 W 运动的带电尘埃会受到离子拖曳力的作用, 它是离子对尘粒的直接碰撞和库仑碰撞的综合结果。直接的离子冲击阻力为^[6]:

$$F_d = -n_i \pi a^2 m_i C_i^2 \left\{ \frac{W}{\sqrt{\pi} C_i} \exp\left(-\frac{W^2}{C_i^2}\right) + \left(\frac{W}{C_i} + \frac{1}{2}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{W}{C_i}\right) \right\},$$

erf 为误差函数。尘埃质量远远大于离子质量, 可以忽略尘埃的反冲。集体效应是自洽的 Vlasov-Maxwell 方程所固有的, 但该方程只能在线性化情况下进行解析推演。带电尘粒穿越麦氏分布的等离子体时所受的离子库仑拖曳力为^[7]

$$F_c = \frac{8\sqrt{\pi} Q^2 q_i^2 n_i}{m_i W^2} \left[\frac{W}{C_i} \exp\left(-\frac{W^2}{C_i^2}\right) + \int_0^{W/C_i} \exp(-z^2) dz \right] \ln \frac{\lambda_D}{a};$$

尚无综合的解析表达式能将离子集体效应及大角散射诸因素包含其中。

考虑到离子的拖曳力, 空间环境中带电尘粒的运动方程为

$$m_d(d\mathbf{V}/dt) = Q(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_c + \pi a^2 \mathbf{P}_{ph}.$$

其中 m_d 、 \mathbf{V} 是尘粒的质量和速度, \mathbf{F}_g 是引力, \mathbf{P}_{ph} 是光压, \mathbf{E} 、 \mathbf{B} 表示电场和磁场。

在共转磁层的等离子体环境中, 带电尘粒所受到的电磁力会远大于邻近卫星产生的摄动力, 必须考虑其对尘粒摄动的影响。尘粒的电荷、质量、径向距离必须在一定的范围才会形成稳定的运动轨道。在土星 B 环的内边沿附近, 如果带电尘粒初始时以开普勒速度运动, 轨道的稳定性极限准确地位于 B 环的内边沿 $1.52R_s$ 处。在此位置之内, 若尘粒具有偏离行星环平面的速度, 它就不再返回环中, 而是逃逸到土星的大气层中。在此位置之外, 带电尘粒具有稳定的运动轨道, 能够一直被约束在行星环里, 或者偏离一定距离后再返回到行星环中。因此, 行星环在此位置内侧被不断地剥蚀, 可以观测到其光学厚度减小, 而在此位置外侧不会如此^[8]。

在行星磁层中, 带电尘粒受到角向和径向的电磁作用力, 其角动量并不守恒, 径向输运会将尘粒弥散在整个磁层中。计算表明^[9] 带电尘埃在地球磁层中的扩散相当迅速, 尘粒轨道变成了椭圆且其偏心率不断增大; 还发现引入等离子体拖曳力可以使同步轨道之内的尘粒轨道蜕变, 使同步轨道之外的带电尘粒产生径向漂移。行星的磁场并非理想

的偶极场,常含有四偶极场或八偶极场分量,如果尘粒穿越行星的非偶极磁场时所经受到的磁场变化与这些摄动振荡频率或其倍频接近时,尘粒偏离圆形轨道的程度就会随时间按指数增长。尘粒所经受到的磁场变化会产生一种等效的周期力,使行星环的厚度增加。共振发生在某些特定的径向距离处,这些径向距离与木星环的光学厚度的径向分布的观测特性基本相符。天王星环处于高度的非偶极磁场之中,带电尘粒与磁场的共振效应有待研究。

彗星附近尘粒的运动主要受到辐射光压、等离子体拖曳和电磁力的影响,引力不起主要作用。Horanyi 和 Mendis 对彗星附近带电尘粒的运动和空间分布进行过数值计算,计算出它们在不同彗心距离处的起伏变化。把光电子发射和电子附着作为充电机制,得出尘粒电荷量随时间的变化。计算表明亚微米量级尘粒的空间分布受电磁力的影响很大,太阳风对流电场的平均方向垂直于彗星黄道面,沿此方向,小尘粒与大尘粒的空间分布区别很大。

石志东和李中元利用哈雷彗星的探测结果,在上述模型基础上^[10~12]经计算发现,半径小于 0.1μ (约 0^{-14}g) 的带电尘埃的运动轨道与中性尘埃显著不同,带电尘埃可以运动到更大的彗心距离处,与飞船实测数据相符。在离彗核 50 000km 左右,尘粒电荷具有负的极大值,尘粒发生静电爆裂的几率最大,而正是在这个距离附近,飞船探测到尘粒质量谱有较大的变化。

土星环中存在着一些角向狭窄但径向扩展的轮辐状结构^[13]。研究表明狭窄的径向扩展是沿径向迅速运动的稠密等离子体云(半径约为几千 km)造成的,这种等离子体云会使行星环尘粒带负电。轮辐结构中包含有微米或亚微米量级的小尘粒,它们与较大的固体颗粒(厘米至米量级)共存。这种稠密的等离子体云是由流星撞击行星环产生的,流星对 B 环的撞击率足以使得行星环上任何时刻都能同时出现 10 个左右的轮辐结构。

3 尘埃等离子体中的波动和不稳定性

尘埃数密度较小时,德拜长度远小于尘粒间距,带电尘粒之间是彼此孤立的,这样的系统称之为“等离子体中的尘埃”,集体效应仍由电子和离子组分产生,带电尘埃会影响这些等离子体波动的色散关系,产生阻尼或不稳定性;当尘埃数密度较大时,德拜长度与尘粒间距相当,相邻尘粒之间的相互影响不容忽略,这种系统是真正意义上的“尘埃等离子体”,带电尘粒作为一种新的等离子体组分,自身会产生一些集体运动。

在实际的空间环境中,尘埃的形状各异,其大小、电荷和质量都具有一定的分布范围。Rao 等人提出一种尘埃等离子体的模型^[14],发现一种新型的类声波模,称为“尘埃声波”,它与等离子体平衡参量,如温度、数密度的依赖关系不同于通常的离子声波。Pilipp 等人^[15]考虑了等离子体、尘埃和中性气体分子之间的碰撞耦合,发现波动与尘埃颗粒发生共振而被阻尼。李中元研究了尘埃等离子体中的脉塞不稳定性^[16],马锦秀研究了尘埃等离子体中的参数不稳定性, D'Angelo 研究了具有剪切离子流的尘埃等离子体中的 K-H 不稳定性^[17]。他们发现负电尘粒具有致稳作用,而正电尘粒则相反。Rawat 指出^[18]尘埃流的速度剪切也会引起尘埃声波的 K-H 不稳定性,石志东和李中元分析了

这种不稳定性对彗尾形态演化的影响^[19]。路立和李中元对尘埃等离子体中的 K-H 不稳定性作了更深入的研究^[20,21]。

Bliokh 和 Yarashenko 研究过尘埃束流与等离子体波动相互作用引起的束流不稳定性^[22]，沿轨道运动的尘埃粒子的引力势能可以驱动等离子体波动以加热离子，这可能是产生土星环轮辐结构的原因之一。

太阳风等离子体流与彗星尘埃相互作用产生的束流不稳定性可以迅速增强太阳风与尘埃之间的耦合。研究发现当太阳风流速较大，尘埃云的速度弥散(即尘粒的随机热运动速度)足够小时，不稳定性较易触发；较轻较小的尘埃颗粒易于触发此不稳定性，从而被太阳风等离子体拖拽而去；较高的中性气体密度会阻止不稳定性的触发。

尘埃电荷 Q 可以达到很大的值。在某些稠密的行星环或尘埃云中尘粒间距 d 很小，尘粒之间的静电相互作用能 $E_q = Q^2/(4\pi\epsilon_0 d)$ 与尘粒的随机热运动能量 $E_{th} = mC_d^2/2$ 相当，可以作为一种强耦合的单分量等离子体(OCP)来处理。

狭窄的天王星环和不闭合的海王星环一直未能得到较为完善的解释，如果静电相互作用能足够大，这些行星环可能实际上就是一些强耦合等离子体。于是窄环的总能量(引力能加上静电能)并不随着环的展宽(环的宽度与 n_d 成反比)而单调连续地减小，而是可能有一个极小值。如果有某个特定的宽度值与能量极小值相对应，那么具有这种径向宽度的行星环将是稳定的，因为行星环要想在径向扩展必须吸收能量。

事实上，尘埃等离子体中的充电过程和波动现象是相互关联和相互影响的，尘粒的充电是电子和离子随机碰撞尘粒的过程，尘粒电量会随机地涨落。尘粒电荷对环境等离子体参数的变化也极为敏感，等离子体波动中的密度和温度的变化都会引起尘粒电荷的相关变化。这正是带电尘埃与多价重离子的本质区别，重离子的电荷量只有等离子体参数变化较大时，才会有所改变。尘埃等离子体过程有它独特的一套处理方法，它已是等离子体物理极重要的分支。空间尘埃等离子体物理学在太阳系研究的广泛应用，可以对许多现象来进行讨论和作出解释，特别对彗星、行星环和行星际介质的研究，它已是一种主要手段和方向^[23]。

参 考 文 献

- 1 Whipple E C. Rep. Prog. Phys., 1981, 44: 1197
- 2 Grun E, Morfill G E, Mendis D A. In: Greenberg R, Brahic A. eds. Planetary Rings, Tucson: University of Arizona Press, 1984: 275
- 3 Havnes O, Goertz C K, Morfill G E et al. J. Geophys. Res., 1987, 92: 2281
- 4 de Angelis U. Physica Scripta, 1992, 45: 465
- 5 Goertz C K. Reviews of Geophysics, 1989, 27(2): 271
- 6 Morfill G E, Grun E, Johnson T V. Planet. Space Sci., 1980, 28: 1087
- 7 Chandrasekhar S. Ap. J., 1943, 97: 255
- 8 Northop T G, Hill J R. J. Geophys. Res., 1983, 88: 6102
- 9 Horanyi M, Mendis D A. Earth Moon Planets, 1987, 37: 71
- 10 Shi Zhidong, Li Zhongyuan, Chen Yao. Chi. Phys. Letters, 1998, 15(2): 155
- 11 石志东, 李中元, 王旭宇. 空间科学学报, 1997, 17(3): 206
- 12 石志东, 李中元. 空间科学学报, 1997, 17(4): 303
- 13 Goertz C K. Adv. Space Res., 1984, 4: 137

- 14 Rao N N *et al.* *Planet. Space Sci.*, 1990, 38(4): 543
- 15 Pilipp W *et al.* *Ap. J.*, 1987, 314: 341
- 16 李中元等, *天体物理学报*, 1998, 18(4): 441
- 17 D'Angelo N, Song B. *Planet. Space Sci.*, 1993, 38: 1577
- 18 Rawat S P S, Rao N N. *Planet. Space Sci.*, 1993, 41(2): 137
- 19 石志东. 博士论文, 合肥: 中国科学技术大学, 1997
- 20 Lu li, Li Zhongyuan *et al.* *Physics of Plasmas*, 2000, 7(1): 424
- 21 路立. 博士论文, 合肥: 中国科学技术大学, 2000
- 22 Bliokn P V, Yarashenko V V. *Sov. Astron., Engl. Transl.*, 1985, 29: 330
- 23 李中元等, *空间尘埃等离子体研究的现状和展望*, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998: 103

A Research in the Space Dust Dynamics

Li Zhongyuan

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

Abstract

The feature of space dust dynamics has been discussed . The paper also presents the properties of charging, waves and instabilities in space dust plasmas , and analyses some phenomena in solar system.

Key words space dust plasmas—comet—interplanetary medium—planetary magnetosphere