

尘埃等离子体*

马锦秀[†]

(中国科学技术大学近代物理系 中国科学院基础等离子体物理重点实验室 合肥 230026)

摘要 尘埃等离子体物理是近十年里等离子体学科中一个活跃的分支领域之一,带电尘埃广泛存在于空间等离子体、实验室聚变装置、低温等离子体工业应用等众多不同的环境中,并且呈现出相同或相似的性质.这是一种部分或完全电离的等离子体,其基本成分除了电子和离子外,还有(通常)带负电的、且电荷不是常数的微粒.带电颗粒有着与电子和离子完全不同的动力学行为,其与等离子体的相互作用呈现出许多新的物理现象.文章介绍了尘埃等离子体物理的简要发展历史、基本性质和主要研究方向以及最近一些热点问题.

关键词 带电尘埃, 等离子体

Dusty plasmas

MA Jin-Xiu[†]

(CAS Key Laboratory of Basic Plasma Physics and Department of Modern Physics,
University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China)

Abstract The physics of dusty plasmas has been an active branch of plasma science during the past decade. Charged dust exists widely in such diverse environments as space plasmas, laboratory fusion devices, and low-temperature plasma applications in industry. Nevertheless, they exhibit the same or similar characteristics. Dusty plasma is defined as partially or fully ionized plasma consisting of, besides electrons and ions, (usually) negatively charged micro-particles with variable charges. The grains have completely different dynamic behaviours compared with electrons and ions. New phenomena emerge as the result of grain-plasma interactions. This paper describes the basic properties of dusty as well as the history and recent topics of interest in their physics.

Keywords charged dust, plasmas

尘埃等离子体(dusty plasma)物理是最近一二十年中迅速成长起来的研究领域,也被称为复杂等离子体(complex plasma).这种等离子体的组分除了电子、离子以及中性气体以外,还包含有带电微粒(多数情况下为固体微粒,成分可以是金属或非金属),微粒的尺寸通常小的可到纳米量级、大的可到几微米或几十微米甚至到毫米量级,微粒的形状可以是规则的,也可以是不规则的.这一物质形态最重要的特点是微粒在等离子体中是带电的(通常情况下带负电),每个颗粒能带成千上万个基本电荷,但荷质比却比离子要小很多个数量级;此外所带的电荷不是常数,是随等离子体参数的变化而变化的,颗粒的运动除了受重力作用外,主要受电磁力的支配.

这一性质使尘埃等离子体有别于含负离子的等离子体,使之呈现出许多新的物理现象,激发起人们的研究兴趣.本文仅就这一领域的历史以及研究现状等作一简单介绍,详细的情况读者可以参阅2004年7月Physics Today上的评述文章^[1]以及其他文献.

1 简要历史

有关尘埃等离子体的研究历史可追溯到一个多

* 国家自然科学基金(批准号10475075,10175064,40336052)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目
2005-06-15收到初稿 2005-10-08修回

[†] Email: jxma@ustc.edu.cn

世纪前的天文观察,星际空间、行星环、彗尾等处均存在大量尘埃颗粒,这些颗粒被电离气体以及被紫外线辐照而带电^[2].实验室尘埃等离子体的研究也可追溯到等离子体学科发展初期 Langmuir 等人观察到的溅射粒子吸附电子现象^[3].在漫长的岁月里,尘埃等离子体研究经历了缓慢的发展,直到 20 世纪 80 年代的两个事件,促成了后来的迅速发展.一个是 80 年代初期旅行者 2 号宇宙飞船飞抵土星时传回的土星环照片,发现 B 环中有径向辐条状物质环绕 B 环外部旋转.这些辐条状物质散射太阳光而被飞船看见,当飞船向土星靠近时,看到的是相对于明亮背景的暗辐条,当飞船离开土星时,看到的是比背景明亮的辐条,如图 1 所示,这说明辐条物是由精细微粒组成,对阳光的散射是米氏散射.更重要的是,这些辐条物不是静止的,而是快速运动的,运动的时间尺度很短,不能用引力来解释,必然受到电磁力的影响.美国的 Hill J 和 Mendis A 以及德国的 Goertz C 和 Morfill G 首先提出这些微粒是带电的^[4],Goertz 和 Morfill 的工作还表明,带电微粒被静电悬浮在土星环平面 80km 处.他们将颗粒带电归结于小流星随机撞击土星环产生的等离子体.在这之后很多从事空间等离子体工作的学者对此产生了研究兴趣.

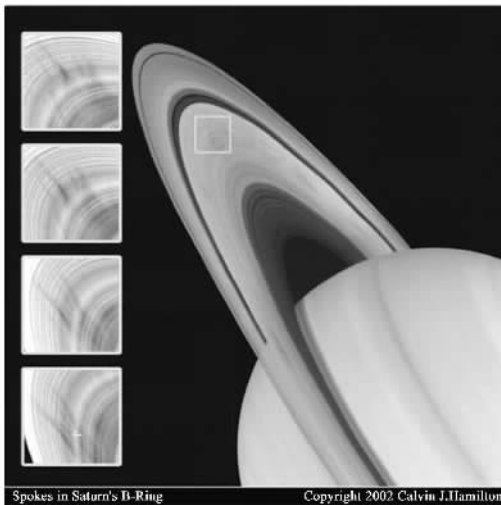


图 1 旅行者 2 号拍下的土星环中辐条状尘埃照片,左框照片时间间隔为 10 分钟^[1]

另一个事件是 IBM 的 Selwyn 等人在 1989 年报道的等离子体刻蚀半导体芯片过程中的尘埃污染^[5].在这之前,微电子工业中经常遇到颗粒污染问题,开始人们总是认为芯片是在空气中被污染的,因而总是不断地提高洁净工作室标准,但总是无法

消除污染.出于商业机密,工业界从未公开这些问题. Selwyn 等人发现尘埃颗粒不是从外界带入的,而是在刻蚀过程中生长起来的.刻蚀中常用的气体是氩气和硅烷等混合气体,后者是极易反应的气体,容易产生二氧化硅,分子间聚集形成尘埃颗粒.在他们的实验中用激光诱导荧光的方法来诊断反应气体的浓度,这样的信号本来是很微弱的,然而他们却意外发现很强的散射信号——来自微米大小的颗粒对激光的散射.这些颗粒被静电悬浮在硅片的上方,相互聚集并生长,如图 2 所示.在放电过程中,这些颗粒被等离子体带电,由电场力和重力相平衡而被悬浮,但在放电结束时电场力消失,它们在重力作用下掉在硅片上,造成污染.这个现象的发现揭示了等离子体材料处理中的尘埃粒子具有与空间环境中的尘埃颗粒相同的性质,使得这两个领域的人们走到一起,共同推动了尘埃等离子体物理的发展.

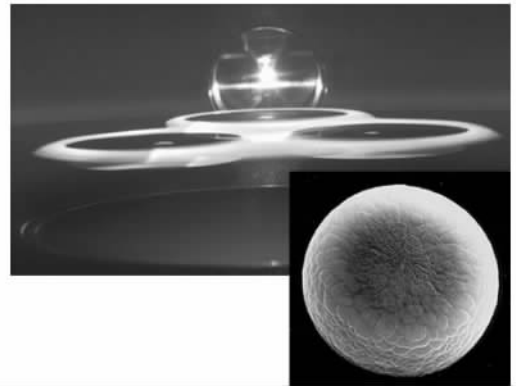


图 2 等离子体刻蚀中硅片上方的尘埃环照片以及尘埃颗粒的电镜图,颗粒直径为 $20\mu\text{m}$ ^[1,5]

Selwyn 等人的发现还有另一层意义.实验室搞基础研究的人们始终在寻找产生强耦合等离子体晶体的方法,他们试图用带电尘埃来产生,但苦于无法将尘埃颗粒托起. Selwyn 等人的实验使他们受到启发,用射频放电和与等离子体刻蚀相同的气体可以产生尘埃颗粒并且利用等离子体鞘层可将它们悬浮在基板的上方.1994 年,我国台湾国立中央大学的伊林等人^[6]以及德国马普研究所的 Morfill 等人^[7]几乎同时在实验上首次实现了尘埃等离子体晶体结构,这就极大地鼓舞了这个领域人们的研究热情.另外,1995 年美国 Iowa 大学的 Barkan 等人在稳态等离子体中观察到尘埃颗粒运动激发的尘埃声波^[8],又推动人们对尘埃等离子体中集体波动与不稳定性问题的研究高潮.

除了空间和材料处理中存在尘埃粒子以外,在

磁约束聚变托卡马克装置的边缘区域也常常发现由于离子轰击而产生的尘埃微粒^[9],这些微粒对等离子体的输运产生深刻影响.由此可见,等离子体中存在带电尘埃是很普遍的现象,使得不同研究方向的学者有了共同的研究兴趣.从20世纪90年代中期开始,很多原来从事空间、实验室、工业应用等离子体的人们改做尘埃等离子体物理的工作,在此之后的10余年中,尘埃等离子体研究得到飞速发展,在等离子体学科中形成一个崭新的分支领域.

2 尘埃颗粒的荷电性质

尘埃等离子体最基本的性质就是颗粒的带电,颗粒上的电荷不是生来俱有的,而是被等离子体中的电子和离子所充电的.颗粒所带的电荷 q_d 由充电方程 $dq_d/dt = I_e + I_i$ 决定,其中 I_e 和 I_i 分别为电子和离子充电电流.带电机制有很多种,最基本的机制是轨道运动受限的静电探针模型^[10].电子、离子由于无规热运动而不断地与尘埃颗粒碰撞,它们在颗粒周围的静电场中作轨道运动,如果碰到颗粒表面,就使之带上一个电荷.通常电子的无规热运动速度远大于离子,因而最先使颗粒带上负电,这样颗粒周围建立的静电场是排斥电子吸引离子的,最终打到颗粒表面的电子电流与离子电流大小相等,颗粒电荷不再增加,达到平衡 $I_e + I_i = 0$,这说明通常情况下颗粒带负电.

充电电流一般与等离子体密度、温度、流速等参数有关,同时也与尘埃颗粒的大小、形状、质地、数密度有关.如果颗粒尺寸远小于德拜长度,则可近似看作球形点电荷,假如数密度比较小,以至于相邻颗粒的间距远大于德拜长度,则可视为孤立的点电荷.在这种情况下,充电电流有解析表达式,对于半径为 r 的金属颗粒,其颗粒表面电位 V_s 与颗粒所带电荷 q_d 的关系为 $q_d = 4\pi\epsilon_0 r(V_s - V_p)$,其中 V_p 为等离子体电位.对于H等离子体,假定电子与离子温度相等,则平衡态 $(V_s - V_p) = -2.51T/e$,如果等离子体温度为1eV,则1 μm 大小的尘埃颗粒带的电荷量为 $-1744e$.在尘埃粒子数密度比较高的情况下,每个德拜球内就不止一个尘埃颗粒,这样颗粒间就会有相互作用,等离子体充电电流也被几个颗粒分享,则颗粒上所带的电荷比孤立情况下的电荷小.

另一种常见的带电机制是光电子发射机制^[11].尘埃颗粒在紫外线辐照下表面会发射电子,发射的光电流与入射光子通量及光电子产额成正比,后者

与颗粒质地有关.在没有别的机制参与下,这种机制会使颗粒带正电.光电子发射机制通常在空间环境中比较常见,在星际空间或地球大气层外往往存在很强的紫外线,这是空间尘埃等离子体带电的主要原因.

此外还有二次电子发射机制^[11].当存在高能电子或离子时,这些粒子在轰击尘埃颗粒的同时,会使颗粒释放出二次电子,其结果使颗粒带正电.只有能量超过几十甚至上百eV的粒子打到尘埃上才会发射二次电子.通常在有高能粒子情况下,如在实验室等离子体的高压鞘层中或空间等离子体的宇宙射线中,这种带电机制显得比较重要.

尘埃颗粒的另一个重要性质就是电荷涨落.与普通等离子体中离子电荷是固定的情况不同,尘埃颗粒的电荷不是固定的,是可以变化的动力学参量.因为颗粒是被等离子体带电的,因此等离子体密度,其电位、温度等参量的改变都会使颗粒电荷发生变化.最常见的是等离子体中的波动,其密度、电位都有扰动,则就有相应的颗粒电荷涨落,这会大大影响波动性质^[12].在通常的实验室低温等离子体中,尘埃颗粒的充电以及电荷涨落时间尺度与离子的振荡频率具有相同数量级,而且颗粒越大,时间尺度越短.因此电荷涨落是相当快的,即使颗粒本身来不及运动,电荷涨落也会对等离子体性质产生很大影响.由颗粒电荷变化引发的研究工作一直是这个领域的热点问题.

3 尘埃等离子体中的集体波动与不稳定性

集体波动与不稳定性是尘埃等离子体物理中研究得最多的课题之一,在最近一二十年里,有大量的文献是有关这方面工作的^[13].尘埃等离子体中除了具有普通等离子体中的波动模式外,还存在尘埃颗粒运动时间尺度下的超低频的“尘埃声波”,这种波动模式具有声波的性质,尘埃颗粒起的作用相当于普通离子声波中的离子,起惯性作用,而电子和离子的作用就像普通离子声波中的电子,对电荷分离场起屏蔽作用,由于尘埃颗粒的质量很大、荷质比很小,因此通常该波是极低频的,波形往往是肉眼可见的.这一波动模式首先是Rao - Shukla - Yu于1990年在理论上预言^[14],1995年Barkan - Merlino - D'Angelo首次从实验上证实^[8].在随后的10年里,人

们对波与不稳定性问题的研究兴趣倍增. Barkan 等人的实验是在磁化的稳态装置(Q-machine)上进行的,尘埃颗粒被阳极附近的电双层捕获而悬浮在火棒(firerod)中,尘埃声波是沿磁场方向传播的静电波,频率只有十几赫兹,相速度只有几厘米/每秒,波形条纹用肉眼清晰可见,如图3所示.

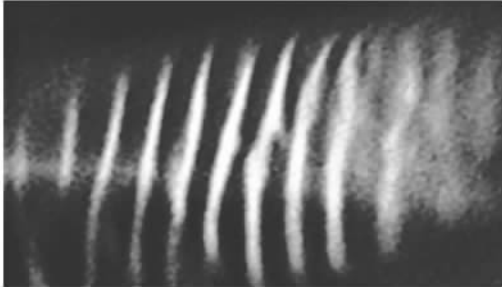


图3 尘埃离子声波波形照片,明亮的条纹是尘埃密度高(压缩)的地方,尘埃颗粒直径为1—15 μm 的精细瓷粉(kaolin),被电双层悬浮在阳极附近^[1,8]

除了尘埃颗粒自身运动形成的“尘埃声波”外,颗粒对其他波动模式会产生深刻影响.这种影响体现在两个方面:一方面尘埃可以消耗相当可观的电子,造成电子和离子的电荷不平衡(因为总体上要保持电中性,即 $en_i - en_e + q_d n_d = 0$,其中 n_i 为离子数密度, n_e 为电子数密度, n_d 为尘埃颗粒数密度);另一方面,尽管在电子或离子运动的时间尺度中颗粒来不及运动而处于静止状态,但颗粒上的电荷以相当快的速度随波涨落,这种涨落引入新的耗散机制,对波起阻尼作用.

受尘埃影响的普通离子声波,称为“尘埃-离子声波”,相速度 v_ϕ 会变大, $v_\phi = (n_i/n_e)^{1/2} c_s$,其中 c_s 为无尘埃时的离子声速.因为通常尘埃带负电,离子密度比电子高,因此相速度比 c_s 大,这样波的Landau阻尼变小,容易传播.另外颗粒电荷涨落引起的阻尼又加剧波的衰减.

对于高频的Langmuir波,尘埃可以造成波频率下移,电荷涨落引起Langmuir波与颗粒电荷弛豫过程的耦合,造成Langmuir波的不稳定性^[12],但当考虑到颗粒收集电子和离子成为损失源时,不稳定性随即消失^[15].

对于电磁波,尘埃颗粒会造成散射,搞空间等离子体的人们就是从观察到增强的雷达散射截面开始研究尘埃等离子体的,例如高纬度上空的夜光云(由冰晶颗粒组成)就会造成强的雷达回波^[16].此外,尘埃的电荷涨落也会改变电磁波在等离子体中

的参量不稳定性等过程,例如降低调制不稳定性阈值强度等^[17].

除了以上几个基本的波动模式受带电尘埃的影响外,尘埃等离子体中的波与不稳定性是内容十分丰富的课题,如果存在磁场,则波动模式更加丰富,很多波动模式都在实验上观察到,读者可参阅最近的几本专著^[11,18].

此外,在最近七八年中,人们对非线性波动及相干结构研究产生极大兴趣^[13],其中包括“尘埃声波”和“尘埃-离子声波”的孤立子^[14,19]、冲击波^[20]、涡旋^[21]等等.在这些非线性相干结构中,尘埃颗粒的电荷变化扮演着重要的角色,如果尘埃电荷为常数、或颗粒充电达到局域平衡,则体系是无耗散的(假如不考虑碰撞、Landau阻尼等耗散机制),在这种情况下,体系会呈现出孤立子结构.但是如果考虑尘埃颗粒的非局域充电,亦即尘埃电荷对波动的响应是需要一定时间的(即使时间很短),则非局域电荷变化起到耗散的作用,使得孤立子结构演变成冲击波结构.如果耗散的作用比较小,则激波波前呈现出振荡结构,如果耗散效应比较强,则激波波形呈现出稳态的上下游结构.这些理论结果先后被实验所证实^[22],读者可参阅文献^[13]的详细评述.

4 强耦合库仑晶体及颗粒间相互作用

以上所述的集体波动都是弱耦合的情况,即相邻粒子间的库仑相互作用能与无规热运动平均动能的比值 $\Gamma = (q_d^2/d)/T$ 远小于1的情况,这里 Γ 称为耦合参数, q 为粒子所带电量, d 为粒子平均间距, $d = (3/4\pi n)^{1/3}$.在尘埃等离子体中,往往容易实现 $\Gamma \gg 1$ 的强耦合情况,原因是颗粒荷电量非常高,当颗粒间距接近德拜长度时,库仑能就变得非常大.从凝聚态物理可知,当 Γ 增大时,系统会经历气相-液相-固相的转变.

1980年,Slattery W L和Doolen G D用Monte Carlo方法对经典等离子体进行模拟,预言当耦合参数 $\Gamma =$ 临界耦合参数 $\Gamma_c = 168 \pm 4$ 时会出现从液体到固体的相变^[23].然而普通经典等离子体通常是处于 $\Gamma \ll 1$ 的气态,只有用激光冷却或Penning阱捕获等办法将离子温度降到非常低时才能实现晶态结构.Ikezi H在1986年提出用带电尘埃微粒来实现库仑晶体^[24],因为微粒通常带有成千上万个电荷,颗粒间的库仑相互作用比普通电子或离子要强很多个数量级,只要耦合参数超过临界值 $\Gamma_c \approx 170$,就可

能形成晶体结构. 后来人们试图在实验室产生尘埃晶体, 但因为颗粒很重, 不容易被托起. Selwyn 等人 1989 年的报道^[5]给人们提供了线索, 利用射频放电鞘层电场可以使尘埃悬浮. 1994 年, 台湾的伊林^[6]以及德国的 Morfill 等人^[7]首次在实验上独立地观察到排列有序的库仑晶体, 开创了这一研究的新局面. 在他们的实验中都是采用电容耦合的射频放电, 尘埃颗粒被约束在射频电极鞘层中, 静电力与重力平衡, 采用激光束照明, 用 CCD 相机观察, 典型的晶体照片如图 4 所示. 伊林的实验是在氩等离子体中加硅烷和氧气, 尘埃是自发生长起来的直径为 $10\mu\text{m}$ 的 SiO_2 颗粒, 而 Morfill 的实验中尘埃颗粒是外加的直径为 $8\mu\text{m}$ 的塑料微球. 有意思的是这些尘埃颗粒可以排列成类似于原子或分子晶体的体心、面心、四面体、六面体等不同的结构^[6], 如果增大射频功率, 则可观察到颗粒从有序排列演化为无序运动, 即从固态到液态的相变.

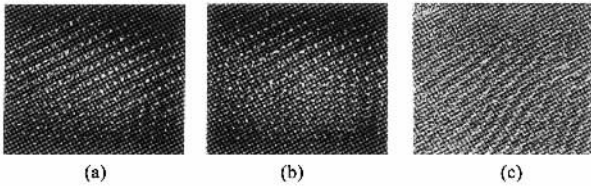


图 4 尘埃晶体结构照片 (a)面心结构 (b)体心结构 (c)链结构^[6]

尘埃晶体实验最重要的意义之一就是宏观可视的手段再现了凝聚态物理中不可视的微观相变过程, 同时也为等离子体中带电粒子间的复杂相互作用提供了可视的验证. 自从首例实验以来, 世界各国大批研究人员对之极大关注, 使这方面的研究成为本领域最具活力的工作. 继上述实验之后, 其他国家的很多实验室也都开展了结晶过程的实验和理论研究, 并且在其他类型的放电装置(如直流放电等)上实现了尘埃晶体及其相变^[25]. 值得一提的是, 中国科学院物理研究所的研究小组在上世纪 90 年代末实现了尘埃晶体、团簇以及相变的一系列实验. 因为尘埃颗粒是被悬浮在鞘层中, 所以改变放电参数可以达到控制被捕获的颗粒的数目, 可以得到多层或单层的尘埃面分布. 因此实验从最初的三维晶体结构到后来的二维的晶面结构^[26], 以至于一维的链结构^[27]都能实现, 而且颗粒的数目也可以控制在只有几个的少体(团簇)结构^[28]到几百上千个的集体结构. 此外还可以利用激光束对库仑晶体中的某

个颗粒进行操纵, 使之激发格点波(lattice wave)^[29]或产生可视的马赫锥(Mach cone)^[30].

实验上的成功激发起人们在理论上探讨尘埃颗粒的结晶机理. 相同电荷的粒子是相互排斥的, 但形成晶体必然存在相互吸引的力, 而这引力必然是在等离子体环境中产生的. Vladimirov 等人提出类比电子在超导体中的库珀对(Cooper pairing)来解释颗粒间的引力^[31], 认为颗粒是悬浮在等离子体鞘层中, 而鞘层中离子的运动是超声速的, 则静电势的分布具有尾场结构, 好比运动的带电粒子在等离子体中激发起尾波一样, 只要每个颗粒处在尾场的波谷, 就能形成稳定的有序排列. 尘埃颗粒在等离子体中就像胶体颗粒处在溶液中一样, 有人试图用离子球模型解释颗粒之间的相互吸引, 也有人直接计算相邻颗粒在静态等离子体中的相互作用势^[32]来寻找是否存在吸引力. 由于问题的复杂性, 至今两个以上颗粒在等离子体中的相互作用仍未研究清楚.

5 鞘层及尘埃颗粒受力问题

鞘层不仅在低温等离子体材料处理中是个极其重要的区域, 而且对于尘埃等离子体来说具有特别的意义, 几乎所有的库仑晶体实验都是在鞘层中进行的. 鞘层中场和粒子的分布对颗粒的悬浮和运动起决定性作用, 而尘埃的存在必然会影响鞘层结构. 早期的鞘层理论表明, 如果尘埃作为一种流体成分, 其密度在鞘层中有特殊的分布, 会出现空间局域结构, 而且在重力和静电力共同作用下会出现分层结构^[33]. 后来的理论对尘埃在鞘层中的捕获、带电、场分布、电负性等等离子体鞘层结构, 以及二次电子发射和紫外线辐射对鞘层的影响等问题作了详细研究^[34]. 颗粒在鞘层中如果受到周期性扰动的作用, 会对扰动产生非线性响应, 响应幅度会呈现出双稳态和滞后效应^[35]. 由于鞘层厚度通常非常小, 实验不容易诊断, 利用颗粒的运动可能提供一种诊断鞘层结构的方法^[36].

相对于电子和离子来说, 尘埃颗粒通常是宏观粒子, 质量 $m_d = (4\pi/3)r^3\rho_d$ (ρ_d 为尘埃颗粒质量密度), 重力 $m_d g \propto r^3$ (g 为重力加速度), 因此较大颗粒的运动在很大程度上受重力支配. 因为颗粒是带电的, 受到电磁力的作用, 静电力为 $F_{es} = q_d E$, 通常电荷与颗粒大小成正比, 即 $F_{es} \propto r$, 因此较小颗粒的运动主要受静电力的支配. 鞘层中的电场很强, 重力容易被静电力平衡, 较小颗粒悬浮在鞘与预鞘的边

界处,大颗粒则悬浮在比较深的鞘层区,如果颗粒太大,则会掉在极板上.在中性的等离子体(bulk plasma)区域,由于电场很微弱,所以通常尘埃不出现.鞘层中离子是以超声速作定向运动的,则离子直接撞击尘埃颗粒或与颗粒发生库仑碰撞,都将施加力在颗粒上,此力称为离子拖拽力^[37],其大小与 r^2 成正比.对于中等大小的颗粒,此力作用可能超过重力.此外在有中性气流情况下,中性气体会施加中性粒子拖拽力,或在尘埃颗粒相对中性气体运动情况下颗粒受到中性气体摩擦力作用^[11],此力也与 r^2 成正比,并且与气压成正比,因此在较高气压下此力比较重要.除此之外,如果气体中存在较强的温度梯度或热流,则由于前后两面受到拖拽力不一样,会出现沿着热流方向的热泳力(thermophoretic force)^[11].在空间环境中常常存在很强的电磁辐射,因此颗粒也会受到辐射压力的作用.这些力是否都作用在颗粒上以及作用的强弱要视具体情况而论.

6 最近几个前沿问题

最近一个热门的焦点是把尘埃等离子体实验搬到无重力环境下的国际空间站上进行.如上所述,在地球表面由于受重力作用,尘埃只能被约束在很薄的鞘层中,而在空间站上,尘埃可以停留在整个等离子体中.图5是一幅国际空间站上的实验照片^[38],可见大量微米大小的尘埃颗粒弥散在整个放电室中,中心区域呈现出一个空洞(void),边界非常清晰.在其他区域,呈现出稳定的晶体结构、液态流体行为,甚至还有清晰的涡旋结构.由此引发了人们对微重力条件下尘埃等离子体的理论和实验研究兴趣.

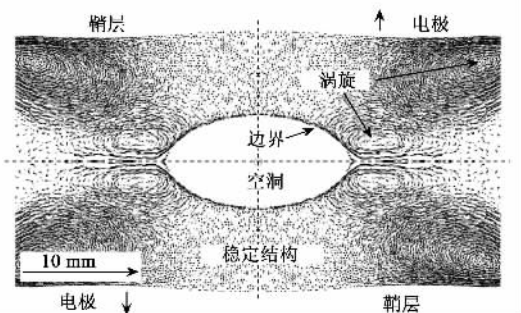


图5 国际空间站上的 Nevedov 等离子体晶体实验照片^[38]

另一个热点问题是二维尘埃晶体中的颗粒进

行操纵,在其中激发晶格波动和马赫锥^[29,30].通常在电极上施加一扰动电压,可激发起格点振动,通过颗粒间的相互作用形成晶格波,这些波可以是纵波也可以是横波^[19].有人还通过在晶面下的导线上加一负电压脉冲,在晶面中激发起冲击波^[39].马赫锥现象类似于超声速(马赫数大于1)物体在空气中激发起波阵面是圆锥形的激波,实验中通常是利用扫描激光束通过辐射压力使晶面中的某一颗粒以超声速运动,从而激发起V字形的马赫锥,或利用晶面上方或下方的另一颗超声速运动的颗粒来激发^[30].这些现象的特点是V字形波前是可见的.

此外,非线性集体波动问题一直是人们感兴趣的课题^[13].过去人们对均匀状态下的波动作了大量研究,最近人们已经开始研究非均匀尘埃等离子体的形成以及波动性质^[40],发现等离子体与尘埃颗粒的碰撞引起的非均匀耗散效应对波的传播起到关键作用.

尘埃等离子体物理是内容极为丰富的研究领域,新的实验现象层出不穷,相应的理论研究也不断发展,本文只是对其中的一些基本问题作简要评述,由于作者知识面有限,不可能面面俱到,读者可参阅其他参考文献以及《物理》1994年第9期发表的《尘埃等离子体物理》一文^[41].

参 考 文 献

- [1] Merlino R L, Goree J A. *Physics Today*, 2004, 57 (7) : 32
- [2] Spitzer Jr L. *Physical Processes in the Interstellar Medium*. New York : Wiley, 1978.
- [3] Langmuir I, Fong C G, Dittmer A F. *Science*, 1924, 60 : 392
- [4] Hill C J, Mendis D A. *Moon and Planets*, 1980, 23 : 53; Goertz C K, Morfill G. *Icarus*, 1983, 53 : 219; Goertz C K. *Rev. Geophys.*, 1989, 27 : 271
- [5] Selwyn G S, Singh J, Bennett R S J. *Vac. Sci. Technol.*, 1989, A7 : 2758; Selwyn G S. *Plasma Source Sci. Technol.*, 1994, 3 : 340
- [6] Chu J H, I Lin. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 72 : 4009
- [7] Thomas H, Morfill G E, Demmel V *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 73 : 652
- [8] Barkan A, Merlino R L, D'Angelo N. *Phys. Plasmas*, 1995, 2 : 3563
- [9] Winter J, *Phys. Plasmas*, 2000, 7 : 3862; Narihara K *et al.* *Nucl. Fusion*, 1997, 37 : 1177
- [10] Whipple E C, Northrop T G, Mendis D A. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90 : 7405; Northrop T G. *Phys. Scr.*, 1992, 45 : 475
- [11] Shukla P K, Mamun A A. *Introduction to Dusty Plasma Physics*. Bristol : Institute of Physics, 2002, Chap. 2

- [12] Varma R K , Shukla P K , Krishan V. *Phys. Rev. E* , 1993 , 47 :3612 ; Jana M R , Sen A , Kaw P K. *Phys. Rev. E* , 1993 , 48 :3930 ; Li F , Havnes O , Melandso F. *Planet. Space Sci.* , 1994 , 42 : 401 ; Ma J X , Yu M Y. *Phys. Rev. E* , 1994 , 50 :2431 ; Ma J X , Yu M Y. *Phys. Plasmas* , 1994 , 1 : 3520
- [13] Shukla P K. *Phys. Plasmas* , 2003 , 10 :1619
- [14] Rao N N , Shukla P K , Yu M Y. *Planet. Space Sci.* , 1990 , 38 :543
- [15] Vladimirov S V , Ostrikov K N , Yu M Y *et al.* *Phys. Rev. E* , 1998 , 58 :8046
- [16] Cho J Y N , Kelley M C. *Rev. Geophys.* , 1993 , 31 :243
- [17] Ma J X , Shukla P K. *Phys. Plasmas* , 1995 , 2 :1506 ; Guerra R , Mendonca J T , Shukla P K. *J. Plasma Phys.* , 1998 , 59 : 343
- [18] Shukla P K , Mendis D A , Desai T. *Advances in Dusty Plasmas*. Singapore :World Scientific, 1997 ; Nakamura Y , Yokota T , Shukla P K. *Frontiers in Dusty Plasmas*. Amsterdam : Elsevier , 2000 ; Bharuthram R , Hellberg M A , Shukla P K *et al.* *Dusty Plasmas in the New Millenium*. Melville : AIP , 2002
- [19] Bharuthram R , Shukla P K. *Planet. Space Sci.* , 1992 , 40 : 973 ; Ma J X , Liu J. *Phys. Plasmas* , 1997 , 4 :253 ; Singh S V , Rao N N. *Phys. Plasmas* , 1998 , 5 :94 ; Popel S I , Golub A P , Losseva T V. *Phys. Rev. E* , 2003 , 67 :6402.
- [20] Melandso F , Shukla P K. *Planet. Space Sci.* , 1995 , 43 : 635 ; Popel S I , Yu M Y , Tsytovich V N. *Phys. Plasmas* , 1996 , 3 :4313 ; Das N , Goswami K. *Phys. Plasmas* , 1998 , 5 :312 ; Gupta M R *et al.* *Phys. Rev. E* , 2001 , 63 :046406 ; Eliasson B , Shukla P K. *Phys. Rev. E* , 2004 , 69 :067401
- [21] Chen Yinhua , Ge Wang , Yu M Y. *Planet. Space Sci.* , 2003 , 51 :81 ; Onishchenko O G *et al.* *Phys. Plasmas* , 2002 , 9 : 1539
- [22] Luo Q - Z , D'Angelo N , Merlino R L. *Phys. Plasmas* , 1999 , 6 :3455 ; Nakamura Y , Bailung H , Shukla P K. *Phys. Rev. Lett.* , 1999 , 83 :1602 ; Nakamura Y , Sarma A. *Phys. Plasmas* , 2001 , 8 :3921
- [23] Slattery W L , Doolen G D. *Phys. Rev. A* , 1980 , 21 :2087
- [24] Ikezi H. *Phys. Fluids* , 1986 , 29 :1764
- [25] Fortov V E , Molotkov V I , Nevedov A P *et al.* *Phys. Plasmas* , 1999 , 6 :1759 ; Sato N *et al.* *Frontiers in Dusty Plasmas*. eds. Nakamura Y , Yokota T , Shukla P K. Amsterdam : Elsevier , 2000 , p. 329
- [26] Nunomura S , Samsonov D , Goree J. *Phys. Rev. Lett.* , 2000 , 84 :5141 ; Samsonov D *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2004 , 92 : 255004
- [27] Misawa T *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2001 , 86 :1219 ; Liu B , Avinash K , Goree J. *Phys. Rev. Lett.* , 2003 , 91 :255003
- [28] Juan Wen-Tau *et al.* *Phys. Rev. E* , 1998 , 58 :6947R ; Chen Y P , Luo H , Ye M F *et al.* *Phys. Plasmas* , 1999 , 6 :699 ; Melzer A , Klindworth M , Piel A. *Phys. Rev. Lett.* , 2001 , 87 :155002
- [29] Morfill G , Ivlev A V , Jokipii J R. *Phys. Rev. Lett.* , 1999 , 83 :971 ; Misawa T *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2001 , 86 : 1219 ; Wang X , Bhattacharjee A , Hu S. *Phys. Rev. Lett.* , 2001 , 86 :2569
- [30] Samsonov D *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1999 , 83 :3649 ; Melzer A *et al.* *Phys. Rev. E* , 2000 , 62 :4162 ; Nosenko V *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2002 , 88 :135001 ; Hou L-J , Wang Y-N , Miskovic Z L. *Phys. Rev. E* , 2004 , 70 :056406
- [31] Vladimirov S V , Nambu M. *Phys. Rev. E* , 1995 , 52 : R2172 ; Vladimirov S V , Ishihara O. *Phys. Plasmas* , 1996 , 3 :444
- [32] Resendes D P , Mendonca J T , Shukla P K. *Phys. Lett. A* , 1998 , 239 :181 ; Wang L. *Comments Plasma Phys. Control. Fusion* , 1999 , 1 :117 ; Lampe M *et al.* *Phys. Plasmas* , 2000 , 7 :3851 ; Markes M E , Williams P F. *Phys. Plasmas* , 2003 , 10 :1152
- [33] Ma J X , Yu M Y. *Phys. Plasmas* , 1995 , 2 :1343 ; Ma J X , Liu J , Yu M Y. *Phys. Rev. E* , 1997 , 55 :4627 ; Liu J , Ma J X. *Phys. Plasmas* , 1997 , 4 :2798
- [34] Liu J *et al.* *Phys. Plasmas* , 1999 , 6 :1405 ; Tsytovich V N , Vladimirov S V , Benkada S. *Phys. Plasmas* , 1999 , 6 :2972 ; Wang D-Z *et al.* *Phys. Plasmas* , 2000 , 7 :1053 ; Liu D *et al.* *Phys. Plasmas* , 2001 , 8 :1427 ; Chutov Yu I *et al.* *Phys. Plasmas* , 2003 , 10 :546 ; Wang Z-X *et al.* *Phys. Plasmas* , 2005 , 12 :012104
- [35] Ivlev A V *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2000 , 85 :4060 ; Wang Y-N , Hou L-J , Wang X. *Phys. Rev. Lett.* , 2002 , 89 :155001
- [36] Annaratone B M *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2004 , 93 :185001
- [37] Barnes M S *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1992 , 68 :313 ; Khrapak S A *et al.* *Phys. Rev. E* , 2002 , 66 :046414
- [38] Nevedov A P *et al.* *New J. Phys.* , 2003 , 5 :33
- [39] Samsonov D *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2004 , 92 :255004
- [40] Liang X *et al.* *Phys. Plasmas* , 2001 , 8 :1459 ; Ma J X *et al.* *Phys. Plasmas* , 2002 , 9 :1584 ; Amiranashvilia Sh , Yu M Y. *Phys. Plasmas* , 2002 , 9 :4825 ; Li Y *et al.* *Phys. Plasmas* , 2004 , 11 :5108 ; Ostrikov K. *Phys. Rev. E* , 2005 , 71 : 026405 ; Xiao D *et al.* *Phys. Plasmas* , 2005 , 12 :052314
- [41] 李芳. *物理* , 1994 , 23 :518 [Li F. *Wuli(Physics)* , 1994 , 23 : 518 (in Chinese)]