

# 带电粒子与二维强耦合尘埃等离子体的相互作用<sup>\*</sup>

侯璐景 姜克 王友年<sup>†</sup>

(大连理工大学物理系 大连 116024)

**摘要** 当船在水中自由滑行时,一方面会在水面产生一个“V”型的尾波,另一方面它会由于水的摩擦而不断减速.有意思的是,当带电粒子在二维强耦合尘埃等离子体表面飞行时,也会发生类似的现象.

**关键词** 强耦合尘埃等离子体,马赫锥,能量损失,准局域电荷近似

## Interaction between charged particles and 2D strongly coupled dusty plasmas

HOU LU-Jing JIANG Ke WANG You-Nian<sup>†</sup>

(Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract** When a ship is moving in water it will excite a "V" shaped wave behind it and at the same time slow down due to the friction of the water. Interestingly, a similar phenomenon will occur when a charged particle is moving over a 2D strongly coupled dusty plasma.

**Keywords** strongly coupled dusty plasma, Mach cone, energy loss, quasilocalized charge approximation

### 1 引言

尘埃等离子体是由电子、离子以及一些带电的固体尘埃颗粒组成的复杂系统,它广泛地存在于星际空间(例如星际媒质、地球电离层、行星环和彗星尾)以及地球上各种气体放电产生的等离子体中(例如加工半导体芯片的放电室及磁约束核聚变实验装置中)<sup>[1-4]</sup>.所以对尘埃等离子体的研究,不仅在空间探测、半导体芯片加工及磁约束核聚变等领域有着重要的应用价值,同时也对丰富等离子体物理基础理论有很大的帮助.

与通常的等离子体相比,尘埃等离子体中实际上是多了一种新的成分——带电尘埃颗粒.相对电子和离子而言,尘埃颗粒具有更大的体积、质量以及带电量.例如在典型的尘埃等离子体实验中<sup>[5-10]</sup>,其直径 $\sim 10^{-6}$  m,质量 $\sim 10^{-13}$  kg,带电量 $\sim 10^4$ 个电子电荷.尘埃等离子体内部带电粒子(尘埃颗粒、电子与离子)之间的相互作用是一个非常复杂的过程(例如电子、离子对尘埃粒子的充电及屏蔽效应

等),而它与外界的相互作用(例如与外界电磁场的相互作用等)更加复杂.这样一个复杂系统对科学家而言无疑是一个挑战,然而挑战与机遇并存.据统计<sup>[3]</sup>,目前尘埃等离子体研究已成为等离子体物理甚至物理界的一大研究热点.那么人们为什么会对它产生如此浓厚的兴趣呢?下面首先就来简单回顾一下这一领域的发展过程.

对尘埃等离子体的系统研究始于大约20年前.20世纪80年代初,美国的旅行者2号航天器在飞过土星时拍摄到其B环上有一些以土星为圆心呈放射状分布的结构(被称为轮辐结构)<sup>[1,3,4]</sup>.有意思的是,这些结构飞快地变化着,通过对其变化频率的分析,科学家得出结论:土星环实际上是由带电的尘埃颗粒组成的.考虑到整个(已知)宇宙空间都充斥着等离子体,土星环成为人们发现的第一例尘埃等离子体.这一发现引起了人们对它浓厚的兴趣,但由于缺乏实验支持,以及人类探索太空所面临的诸多

<sup>\*</sup> 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目

2006-11-21 收到初稿 2007-01-11 收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: ynwang@dlut.edu.cn

实际困难,使得当时对这一领域的直接研究受了到极大的限制.这种状况一直持续到20世纪80年代末.1989年Selwyn<sup>[2]</sup>等人用等离子体加工半导体芯片的过程中,意外地观察到大量尘埃颗粒悬浮在被加工芯片上方,并在放电结束时落在芯片表面而对芯片造成污染.对实验的分析发现,尘埃颗粒带有一定的负电荷,而在放电过程中,芯片上方会形成一个负的电势场,这使带电尘埃颗粒能够悬浮在等离子体中,而当放电结束时电场消失,尘埃粒子就都落了下来.这是人们第一次在实验室发现尘埃等离子体,而更重要的是,人们第一次发现造成芯片污染的原来是来自内部的尘埃颗粒.在半导体工业降低芯片污染的客观需求地推动下,许多实验室相继成立并对尘埃等离子体开始了专门的实验研究.请注意,截至此时人们对尘埃等离子体的理解还只是“被污染的等离子体”,即把带电尘埃粒子看作是一种杂质.然而之后不久,大规模的实验研究就揭示了另外一个非常奇特的现象,同时给了尘埃等离子体一个全新的概念,这就是1994年实验室尘埃晶格<sup>[5-8]</sup>的发现.

1994年<sup>[5-8]</sup>4个不同的实验室几乎同时在等离子体放电室中观察到,悬浮在放电电极板上方的尘埃颗粒,会在一定的条件下形成一些有序的、类似晶体的结构,如简单的平面六边形、面心立方体及体心立方体等,即所谓的尘埃晶格.尘埃晶格是尘埃等离子体领域迄今为止最为奇特的现象之一,它开辟了一个新的交叉学科——强耦合尘埃等离子体(所谓强耦合是指尘埃粒子之间的相互作用能远远大于其热动能,或者说两者比值 $\Gamma \gg 1$ ,而 $\Gamma$ 则被称为是耦合常数).由于强耦合尘埃等离子实验相对简单,同时其实验现象容易观测,所以可以将其作为一种强耦合系统的样板系统进行研究.这也正是近年来此领域备受科学家青睐进而成为一大研究热点的原因.需要说明的是,近年来这一领域的新奇发现不胜枚举,例如尘埃晶格波、尘埃空洞、尘埃晶格在磁场作用下的旋转、尘埃晶格中的马赫锥,特别是带电粒子与强耦合尘埃等离子体的复杂相互作用<sup>[4,9-13]</sup>等等.对于这些现象的介绍及详细讨论可参阅文献<sup>[3,4]</sup>及其中的参考文献,由于篇幅所限,这里只对最后一点——带电粒子与强耦合尘埃等离子体的相互作用进行稍微详细地介绍.

大家知道,当一个入射粒子在某种媒质中穿行时(比如说船在水中行驶时),一方面会对媒质产生扰动,这些扰动通常以波的形式向四周传播;另一方

面入射粒子会与媒质发生一系列弹性与非弹性碰撞,从而不断损失其能量.同样,当一个入射带电粒子快速地在(强耦合)尘埃等离子体中运动时,也具有以上两个现象.其中前者常被称为马赫锥现象,后者则被称为能量损失问题.

## 2 尘埃等离子体中的马赫锥现象

最近<sup>[9,10]</sup>,有实验观察到当一个带电粒子在二维尘埃晶格下方高速运动时,会在尘埃晶格面上产生一个“V”型扰动,即马赫锥<sup>[9,10]</sup>,如图1所示.其实,马赫锥这个词更常见于气体动力学问题的研究中,当声源的运动速度超过其所在媒质(比如说空气)中的声速时,声源总是快于扰动声波的传播,这些波前的包迹就形成以声源为顶点的圆锥面,称为马赫锥,而其锥角 $\theta$ 、媒质的声速 $v_s$ 以及声源速度 $v$ 之间有一个关系: $\sin\theta = v/v_s$ ,常被称为马赫锥锥角关系<sup>[13]</sup>.需要注意的是,马赫锥的结构是由媒质的色散关系决定的,例如对于空气这种弱色散媒质而言,其中的马赫锥就是一个简单的圆锥面<sup>[13]</sup>.然而由于尘埃等离子体色散关系的复杂性,马赫锥的结构也要复杂得多<sup>[9-11,13]</sup>.

在随机相位近似(RPA)下,尘埃等离子体的色散关系可以写为: $\omega^2 = \omega_{pd}^2(k\lambda_D)^2 / \sqrt{1 + (k\lambda_D)^2}$ ,其中 $\omega_{pd}$ 和 $\lambda_D$ 分别为尘埃等离子体频率和等离子体德拜半径.当波长 $k \rightarrow 0$ ,也即在长波近似下我们就得到了尘埃等离子体声速: $v_s^{RPA} = \omega/k = \omega_{pd}\lambda_D$ .这里需要说明的是,RPA忽略了带电尘埃粒子之间的耦合效应,所以只适用于弱耦合尘埃等离子体,即耦合常数 $\Gamma \ll 1$ 的情况.但对于尘埃晶格这样的强耦合系统,忽略耦合效应将会导致明显的误差.

为了考虑这种强耦合效应,我们最近采用所谓的准局域电荷近似(QLCA)理论<sup>[14]</sup>模型来研究带电粒子在二维尘埃等离子体中产生的马赫锥问题<sup>[11]</sup>.这个理论可以被认为是在RPA的基础上引入了一个对色散关系的修正项 $D(k)$ ,其中很好地考虑了尘埃粒子之间的耦合效应.此时尘埃等离子体的色散关系可以写为: $\omega^2 = \omega_{pd}^2(k\lambda_D)^2 [1 + D(k)] / \sqrt{1 + (k\lambda_D)^2}$ <sup>[11,12]</sup>.需要指出的是,当 $k \rightarrow 0$ 时,我们得到 $v_s^{OLCA} = \omega/k \approx \omega_{pd}\lambda_D \sqrt{1 + D(0)}$ ,因为 $D(0) < 0$ , $v_s^{OLCA} < v_s^{RPA}$ ,所以当入射粒子速度一定时有马赫锥锥角 $\theta^{OLCA} < \theta^{RPA}$ 的关系,如图1所示.

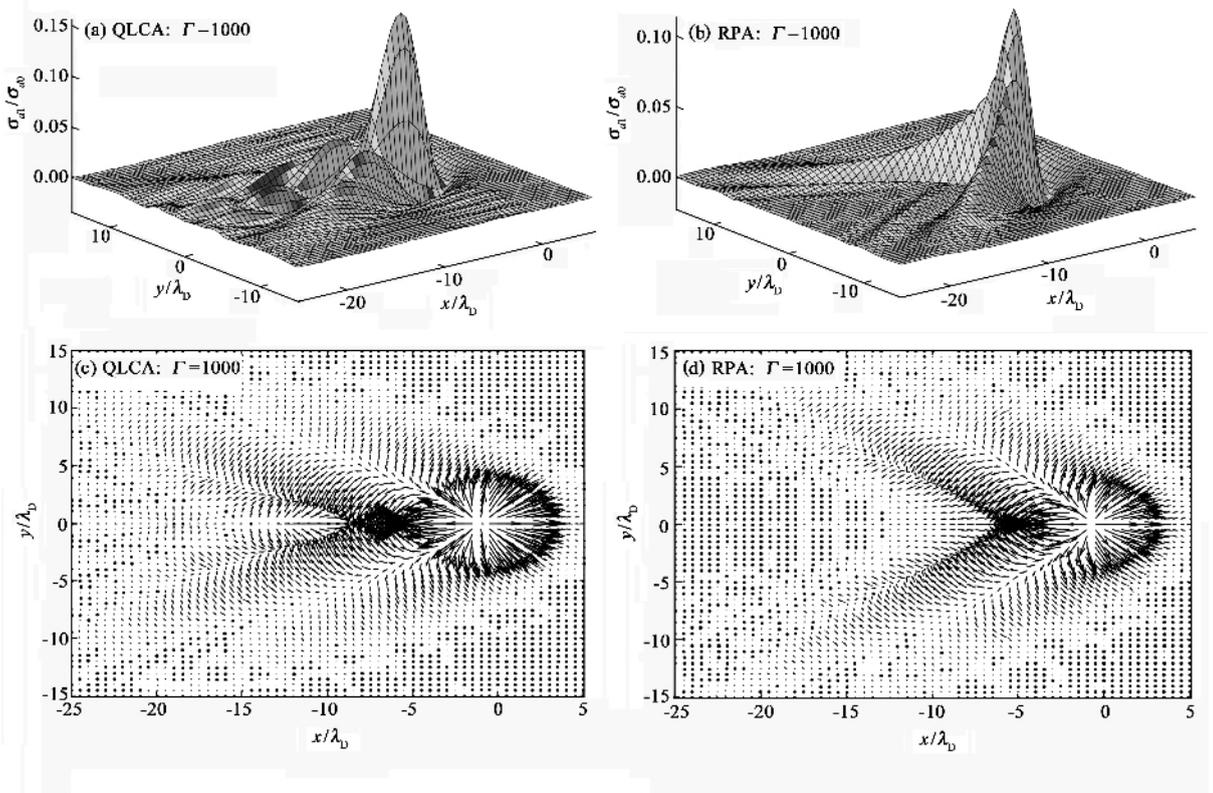


图1 当  $\Gamma=1000$ , 入射粒子速度  $v=1.0\text{cm/s}$  时, 马赫锥区域尘埃粒子扰动密度 (a)和(b) ]与扰动速度 (c)和(d) ]的空间分布情况. 其中左侧为准局域电荷近似 (QLCA) 所得结果, 右侧为随机相位近似 (RPA) 所得结果<sup>[11]</sup>

### 3 运动粒子的能量损失

如上所述, 当入射粒子在媒质(尘埃等离子体)中运动时会激发起波的传播并形成马赫锥, 换个角度可以认为, 媒质中的粒子在此过程中获得了能量. 根据能量守恒原理, 入射粒子在与周围媒质的相互作用过程中将能量传给了周围的媒质, 所以其自身的能量必然减小. 通常把入射粒子在单位路径上的能量减小量称为能量损失. 其实, 入射粒子与物质相互作用过程中的能量损失问题是一个“古老”而至今仍十分活跃的研究领域. 此前的研究主要是针对带电粒子与固体及等离子体的相互作用问题<sup>[4]</sup>. 而对于在强耦合尘埃等离子体中入射粒子的能量损失问题此前还是空白<sup>[12]</sup>.

我们最近分别采用了 RPA 和 QLCA 理论以及分子动力学 (MD) 模拟方法, 研究并比较了带电粒子从二维强耦合尘埃等离子体表面飞过时的能量损失情况<sup>[12]</sup>. 图 2 给出了三种方法在不同耦合强度时所得结果的比较. 从图中可以看出, 入射粒子的能量损失随入射速度的分布曲线呈现出明显的山形结构, 而峰值的位置大约在媒质的声速附近. 从物理角

度讲此时入射粒子与媒质之间发生了共振, 因而能量交换效率最高. 通过对比可以发现, 传统的 RPA 理论由于忽略了尘埃粒子之间的强耦合效应, 其结果与 MD 结果存在一定的偏差, 而这种偏差在低速区域非常明显. 相反, QLCA 结果在整个速度范围内都与 MD 符合较好, 这说明 QLCA 理论成功地描述了尘埃粒子之间的强耦合效应. 此外, 图 2 还给出了当入射粒子与尘埃粒子带相反电荷时能量损失的 MD 模拟结果, 即在低速区域带有相反电荷入射粒子的能量损失总是小于带有相同电荷入射粒子的能量损失, 而在高速区域这两者相互重叠. 这个现象被称为 Barkas 效应. 这实际上反映了非线性效应对能量损失的影响.

作为一种线性理论, QLCA 与 MD 在图 2 中符合得很好, 这说明此时的非线性效应并不明显, 或者说此时入射粒子与尘埃等离子体之间的相互作用是线性的. 那么, 在非线性相互作用时入射粒子的能量损失会是如何呢? 那时, QLCA 还适用吗? 接下来我们就来讨论一下这些问题. 当入射粒子与二维强耦合尘埃等离子体相距较远时, 它对尘埃面的扰动较小, 因而它们之间的相互作用可以认为是线性的. 然而, 当入射粒子向尘埃平面靠近时, 它对尘埃面的

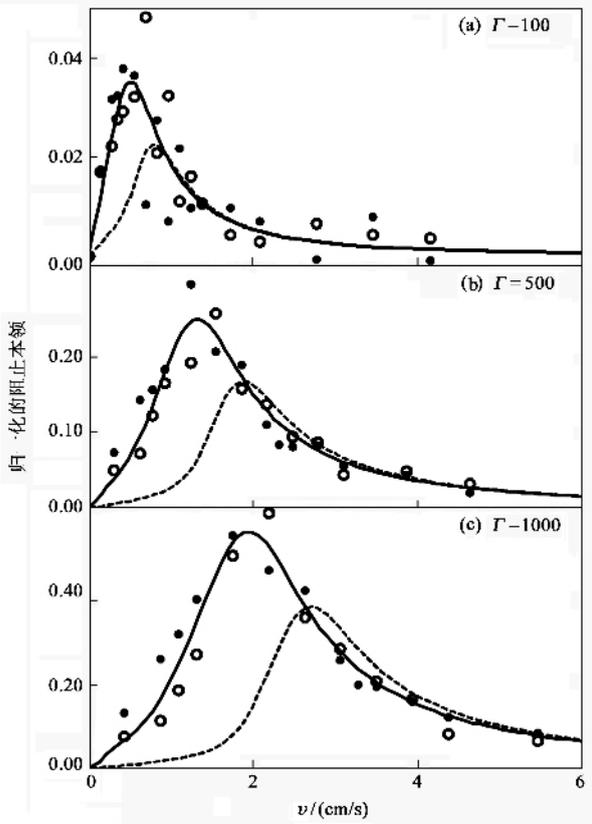


图2  $h = 1.6\lambda_D$  不同耦合常数时能量损失随入射粒子速度的分布. 其中实线和虚线分别为 QLCA 和 RPA 结果, 实心圆和空心圆分别表示入射粒子与尘埃粒子带相同电荷和相反电荷时的分子动力学模拟结果<sup>[12]</sup>

扰动增强, 非线性效应也会增强. 图3给出了入射粒子处于不同高度(入射粒子与尘埃面之间的距离)时能量损失与入射速度之间的关系曲线. 可以看到入射粒子的能量损失随着其高度的减小而显著增大. 同时通过对比 QLCA 及 MD, 也可以发现当入射粒子距离尘埃平面较远时, QLCA 与 MD 符合得非常好, 而当距离减小时, 偏差首先在低速区域产生并随着距离的不断减小而增大, 同时随着距离的不断减小而向高速区域扩展<sup>[12]</sup>. 可以看到当高度  $h = 0.2\lambda_D$  时, 线性理论几乎完全失效.

### 4 结束语

本文分别从马赫锥和能量交换两个方面讨论了入射带电粒子与二维强耦合尘埃等离子体之间的复杂相互作用过程. 并通过准局域电荷近似(QLCA)理论, 随机相位近似(RPA)理论以及分子动力学模拟之间的对比, 揭示了强耦合效应以及非线性效应对这一相互作用过程的影响.

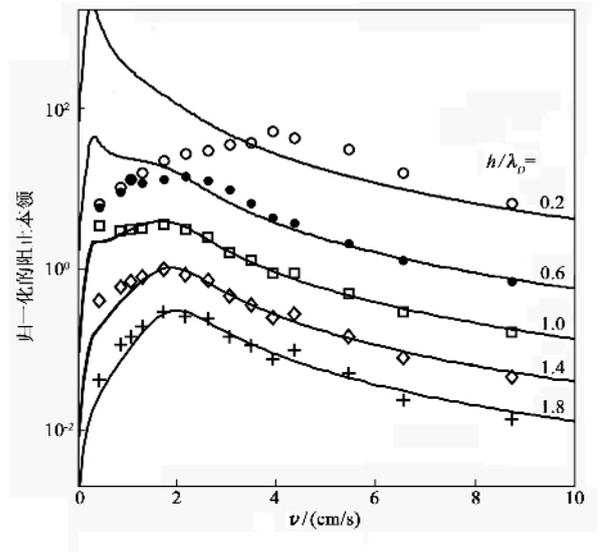


图3 入射粒子处于不同高度时能量损失随入射粒子速度的分布<sup>[12]</sup>

### 参考文献

- [ 1 ] Smith B A *et al.* Science ,1982 215 504
- [ 2 ] Selwyn G S , Singh J , Bennett R S. J. Vac. Sci. Technol. , 1989 ,A7 2758
- [ 3 ] Merlino R L , Goree J. Phys. Today 2004( 7 ) 1
- [ 4 ] 侯璐景. 射频鞘层中尘埃粒子的运动过程及尘埃晶格形成机理的研究. 大连理工大学博士论文, 2005
- [ 5 ] Chu J H , Lin I. Phys. Rev. Lett. ,1994 72 4009
- [ 6 ] Thomas H , Morfill G E , Demmel V *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1994 73 652
- [ 7 ] Hayashi Y , Tachibana K. Jpn. J. Appl. Phys. ,1994 33 1804
- [ 8 ] Melzer A , Trottenberg T , Piel A. Phys. Lett. A ,1994 ,191 301
- [ 9 ] Samsonov D , Goree J , Ma Z W *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 , 83 3649
- [ 10 ] Melzer A , Nunomura S , Samsonov D *et al.* Phys. Rev. E 2000 , 62 4162
- [ 11 ] Jiang K , Hou L J , Wang Y N *et al.* Phys. Rev. E 2006 73 : 016404
- [ 12 ] Hou L J , Miskovic Z L , Jiang K *et al.* Phys. Rev. Lett. 2006 , 96 255005
- [ 13 ] Dubin D. Phys. Plasmas 2000 7 3895
- [ 14 ] Kalman G , Golden K I. Phys. Rev. A ,1990 41 5516 ; Golden K I , Kalman G. Phys. Plasmas 2000 7 14