微重力环境下的复杂等离子体实验

杜诚然　李阳芳

人们日常生活中常见的物质形态有三种：包括固态，例如冰块；液态，例如水；气态，例如空气和水蒸气。等离子体是除此之外的第四种物质形态。等离子体其实和人们的生活息息相关，最常见的莫过于用于照明的荧光管中的辉光了。等离子体作为除固体、液体和气体之外的第四种基本的物质相态，更多地存在于宇宙空间中。

为了能够通俗地理解等离子体的产生过程，可以简单地认为：固态的冰块通过加热可以变成液态的水，进一步加热水可以产生气态的水蒸气，如果对水蒸气进一步加热就可能产生等离子体。不同于气体中只存在中性的气体分子，等离子体中还含有大量的正负离子和自由电子。然而电离的方式并不局限于广义的“加热”，还有很多其他方式，例如在实验室中，对气体施加直流电压或者射频电压也能导致放电而生成等离子体。如果我们在等离子体中引入宏观尺度的尘埃颗粒（颗粒直径从几百纳米到几十微米不等，见图1（a）、（b）），组成一种更加复杂的混合粒子系统，就形成了本文所要介绍的复杂等离子体（complex plasma）。

早期的复杂等离子体研究主要集中在宇宙物理学中，土星环就是一个很典型的例子。在旅行者（Voyager）和卡西尼（Cassini）飞行器拍摄的近距离照片中可以观察到悬浮于土星环 B 环平面上的辐条状尘埃云，就是由复杂等离子体形成的。在工业上使用等离子技术的芯片刻蚀中，悬浮在待加工的基片上方的尘埃颗粒可能在加工完成阶段掉落在芯片电路上从而导致产品缺陷。在热核聚变放电装置中，尘埃杂质的存在会导致放电不稳定从而带来很多新的问题。由于早期的研究中等离子体中的尘埃颗粒大部分是自然生成而非人为添加的，复杂等离子体也被称为尘埃等离子体（dusty plasma）。

1994 年，德国、日本、台湾等国家和地区的 3 个研究小组先后独立地在实验室中观察到尘埃等离子体晶格（plasma crystal），极大地提高了大家对复杂等离子体研究的兴趣。我们在前面提到，等离子体中存在大量的正负离子和自由电子。由于电子质量比离子小很多（一个电子的质量只相当于一个质子的 1/1837），它们显得更活跃，所以电子与尘埃颗粒的碰撞会更加频繁，从而导致尘埃颗粒比较多地带负电。在其他条件不变的情况下，尘埃颗粒表面的带电量和其尺寸成正比。另外比较重要的一点是，在等离子体

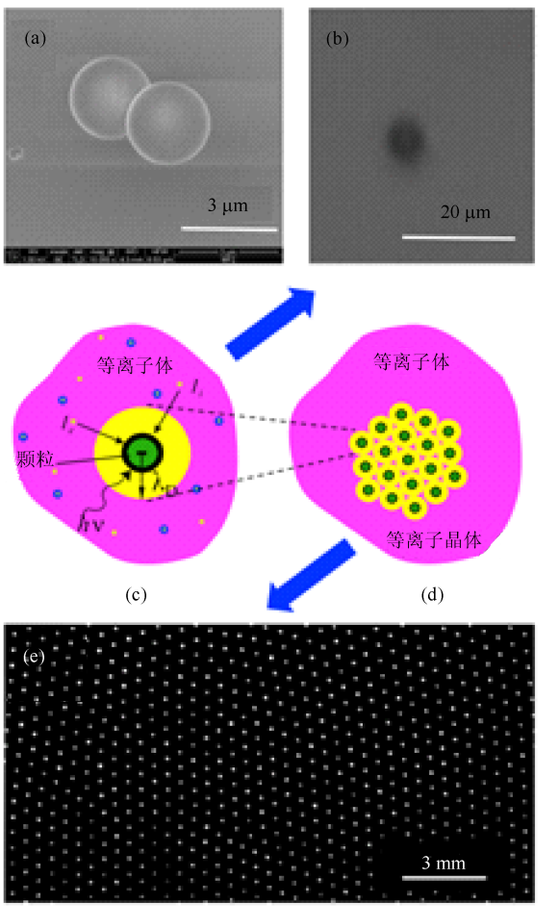

图 1　等离子晶格系统示意图。图中红色区域代表等离子体，绿色圆点代表尘埃颗粒，黄色圈则代表了由等离子中电子和离子的屏蔽效应（黄色区域大小由德拜长度 λ_D 决定）

环境中，尘埃虽然和电子离子类似，属于带电粒子的一种，但是不同点在于它们的尺寸比离子也大很多。一般离子的尺寸都小于一个纳米，而实验室研究采用的尘埃颗粒的直径大多在微米左右。由于惯性（质量）的显著增加，尘埃在等离子中的运动速度会明显降低，以至于在一定条件下尘埃几乎停止了运动。

为了叙述的方便，需要在下面引入尘埃颗粒之间相互作用势的概念。我们知道带电粒子之间会相互作用，取决于所带电荷的正负，它们相互之间或排斥或吸引。正负离子和电子之间的相互作用基本可以用库仑相互作用来很好地描述，而尘埃颗粒一方面比离子大很多，另一方面它们之间的相互作用是通过大量电子和正负离子的参与来实现的，所以尘埃与尘埃之间的相互作用势是非常复杂的，这也一直是尘埃等离子体领域的研究热点。不过我们可以直观的认为，尘埃之间靠得越近，所带电荷越多，它们之间的相互作用势就越大，所以尘埃颗粒之间的相互作用（汤川（Yukawa）相互作用势）可以用如下描述：

$$\phi(r) \propto \frac{q}{r} \cdot \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right),$$

其中 q 为尘埃颗粒带电量，r 为颗粒间距离，λ_D 为德拜长度，代表了等离子体中电子和正负离子参与的影响，产生一定的屏蔽效应。在尘埃之间的相互作用势非常强的条件下，尘埃颗粒不仅会几乎停止运动，并且可以自组织地排列成有序的晶格结构，就是所谓的尘埃等离子体晶格（图 1（c））。因为尘埃颗粒大小为微米量级，在尘埃等离子体晶格实验中，人们可以用激光来照明颗粒并用摄像机拍摄单个颗粒的运动以及其组成的晶体结构。简单地说，原来需要复杂设备来研究的，发生在“原子”尺度的晶体特性和波动现象等，现在可以借助尘埃等离子体这个媒介采用简单的激光照明加光学摄像就能实现。

图 1（d）所示，大小相同的尘埃颗粒在一定条件下排列成规则的几何结构，形成等离子晶格。如果我们将单个颗粒及其周围环境放大，如图（c）所示，颗粒的带电量由电子流 I_e 和离子流 I_i 以及 UV 射线 $h\nu$ 共同作用所决定。 图 1（a）给出的是扫描电子显微镜（SEM）下的两个尘埃颗粒细节图，在非等离子体环境下，颗粒并不带电，在没有排斥力的作用下颗粒可以非常靠近，甚至贴在一起；图 1（b）给出的是长距光学显微镜中单个尘埃颗粒悬浮在等离子体中的情况，注意德拜屏蔽效应和等离子体在图中并不能由肉眼直接观测，由于汤川（Yukawa）相互作用势，其相邻颗粒在德拜长度外，并不包含在图 1（b）中；图 1（e）是德国马普学会地外物理研究所理论和复杂等离子体课题组利用 CCD 摄像机拍摄的二维尘埃等离子晶格，每一个白色亮点就是一个尘埃颗粒，即图 1 中的一个绿点。

然而，在重力环境下，尘埃颗粒只能悬浮在具有强电场的等离子鞘层之中，所形成的等离子晶格也主要是二维系统，即使使用大量较小的颗粒局限在一个相对较小的空间从而强行形成一个由薄薄几层颗粒组成的三维等离子晶格，其颗粒数密度在重力的作用下也并不均匀（图 2 下左）。在经典的固体晶体中，重力相对与原子间的相互作用力可以忽略不计，晶体内部的原子分布非常均匀。因此，为了模拟自然中三维晶体的结构，在复杂等离子体系统中完美地形成一个均匀的三维晶体，克服重力的影响是很重要。热泳（thermophoresis）是其中的一个解决方案，如果人为地在射频放电中加入一个垂直向下的温度梯度，其产生向上的热泳力在一定程度上可以克服重力的影响。然而，温度梯度的引入有很大的副作用，其在电离气体中形成的涡流能轻而易举地摧毁人们所感兴趣的物理现象。最理想的解决方案便是从源头上去除重力的影响。德国马普学会的地外物理研究所（Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics）和俄罗斯科学院的高温联合研究所（Joint Institute for High Temperature）从 20 世纪 90 年代中期就在这方面开始了漫长的探索，并取得了瞩目的成绩。

1．微重力下复杂等离子体实验的发展

早在 1986 年，日本的池地（Ikezi）就在理论上预言了库仑晶格的存在，可是当时的理论仅限于三维系统。当德国马普学会的墨菲尔（Morfill）和托马斯（Thomas）等人在实验中成功地观察到二维尘埃等离子晶格，在微重力环境下进行三维等离子晶格试验便提上了议事日程。第一代微重力实验是在探空火箭中

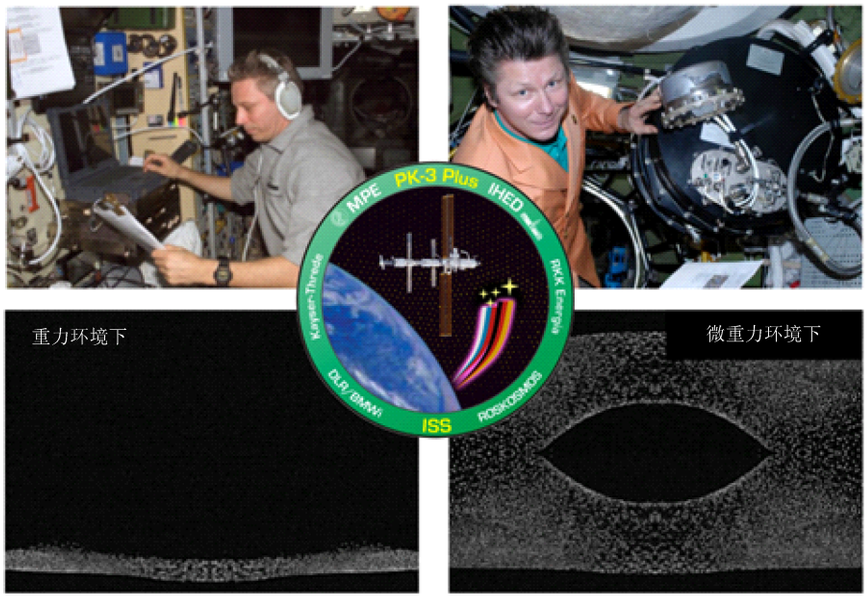

图 2　上左图中德国宇航员赖特（Reiter) 和上右图中俄罗斯宇航员帕达尔卡（Padalka）分别于 2006 年和 2009 年在国际空间站操作 PK-3 Plus 实验装置进行等离子体晶格试验。下图中实验装置中尘埃颗粒在在重力和微重力条件下在射频放电中的不同悬浮位置

进行的。在与德国宇航局（DLR）的合作中，墨菲尔等人将一个边长约为 10 cm，高约 5 cm 的方形射频放电腔放入探空火箭 Texus 中，放电腔上安装有一个颗粒散播器（与 PK3-Plus 装置相似，可以参考图 3），可以将大小相同的颗粒撒入放电腔的等离子体中，颗粒在等离子中电子和离子的作用下带负电，相同的带电性所产生的排斥力能防止颗粒在放电腔中的凝结。图 2 下两图中白色亮点就是悬浮在等离子体中的尘埃颗粒。在重力环境下，颗粒聚集在靠近下电极的地方。在微重力环境下，颗粒较均匀地充满整个放电腔，形成一个较大尺度的三维复杂等离子体系统，中间产生一个无尘埃颗粒的区域，就是所谓的“空洞”。（参见图 2 下右）。Texus 分别在 1996 年和 1998 年进行了两次实验，当火箭发射进入约 270 km 高空后，发动机自动关闭，火箭进行抛物线运动自由下坠，由此产生的微重力环境可持续 6 分钟，足以多次重复进行从放电、散播颗粒、录像等一系列实验步骤。遗憾的是，在这两次实验中并没有直接观测到等离子晶格。然而，这两次尝试为之后在空间站上的微重力实验积累了宝贵的经验，所使用的射频放电腔也成为日后实验装置的雏形。

与此同时，在俄罗斯的莫斯科，时任俄罗斯科技部长的弗托夫（Fortov) 也对等离子晶格研究产生了兴趣。当时的俄罗斯拥有世界上唯一一座在轨运行的空间站——和平号空间站。利用得天独厚的条件，弗托夫等人于 1998 年将实验装置 PK-1 直接送入了空间站。严格地说，这并不是一个真正的复杂等离子体实验。实验所用的长约 6 cm，直径约 3 cm 的圆柱形玻璃密闭容器并不能放电，使用的颗粒也是预先放入容器中的。实验中，宇航员在阳光下摇动密闭容器，铜质颗粒在紫外光照射下失去自由电子而带正电，自由电子瞬间被吸附在容器玻璃壁上。由于容器中相对较高的气压，带正电颗粒在库仑作用下缓缓从容器中心向外扩散，在扩散过程中，系统隐约呈现出晶格结构，就是所谓的库仑晶格。由于缺乏足够的实验数据，这个结果未能被完全证实。

在两国独立进行研究的同时，德俄合作也在悄然酝酿。在弗托夫的大力推动下，墨菲尔和俄罗斯高温联合研究所的执行主任涅费多夫（Nefedov）在数次讨论磋商后，于 1998 年正式签署了德俄在微重力环境下的复杂等离子体实验的合作协议。两国合作的复杂等离子体实验装置 PKE 于 2001 年在拜科努尔火箭发射场由俄罗斯的进步号（Progress）太空船送入国际空间站的俄罗斯空间舱，PKE 也成为国际空间站上第一个科学实验。不幸的是，涅费多夫在实验装置升空后不久因病去世，为了纪念这位复杂等离子体微重力实验的先驱，PKE 装置被命名为 PKE-Nefedov。PKE 的放电装置与 Texus 的放电装置十分类似，也是方形射频放电装置，然而其气体供给系统，激光照明系统等辅助系统被重新设计以适合空间站实验，其中最重要的改进是实验控制系统“TeleScience”，这是一套自动与手动相结合的控制系统，既可运行预编程序，

也可由宇航员手动输入实验参数进行实验。在 PKE 的一系列实验中，人们首次在微重力环境下观测到了三维等离子晶格。然而，人们也认识到，即使在微重力条件下，要形成大尺度的三维晶格结构并不容易。类似在地面实验中的二维尘埃晶格实验，微重力环境下也很容易在尘埃云的中心产生空洞（无尘埃区）。由于实验中的电离过程主要发生于装置的中心位置，放电产生的离子流和电子流从中心向外扩散，离子和电子流动过程中会拖着尘埃一起运动，也就是所谓的离子和电子拖曳力（类似如流水拖着漂浮的木头前进），从而将带电颗粒向外推导致空洞（图 2）。空洞的产生增加了尘埃等离子晶格的不均匀性。在实验中，晶格更多地存在于空洞上方的一小片区域，因此如何去除空洞便成了科学家们面对的又一大挑战。相关的实验仍然在不同装置中持续至今。PKE 装置在国际空间站工作了 4 年之后，于 2006 年被更新一代的 PK-3 Plus 装置所接替。

这里还有一个小插曲，在 PKE 装置送入空间站初时，并没有安装真空泵，科学家们计划将装置连接到空间站外，使用太空中自然真空环境来控制放电腔气压。然而，实验中太空真空并不能将装置中气压降低到所需要的本底气压。科学家们很快发现了这个问题，并在之后一次的国际空间站补给任务时，将一个涡轮泵送入空间站并由宇航员安装到了 PKE 装置上，从而使之后的实验可以顺利进行。

延续 PKE 实验，PK-3 Plus 也是一个方形射频放电装置（图 3），然而其辅助系统有了长足的改进。PK-3 Plus 既可使用氩气又可使用氮气放电，尘埃颗粒的选择也从 2 种增加到了 6 种，这使混合多种颗粒实验成为了可能。在成像方面，3 台 CCD 摄像机分别从不同尺度观察颗粒的运动，除此之外，有一台额外的摄像机用来观察等离子辉光。为了观察等离子晶格的三维结构，摄像机和激光照明系统被安装在同一平台上并可在沿垂直于激光照明面的方向上扫描。自从 PK-3 Plus 在国际空间站上开始工作，至今已进行了 18 次任务，每年 2 至 3 次，空间实验每次持续 3 至 4 天，其余时间装置处于关闭保养的状态。作为两国合作实验项目，每次任务前由德国和俄罗斯科学家讨论决定具体的实验方案，并在任务开始前一周将实验程序通过无线电上传到国际空间站，在实验期间，两国科学家在莫斯科近郊科罗廖夫的国际空间站控制中心，直接与在轨宇航员一起操作和监控实验，装置中安装的摄像机可以直接将实验图像传输至地面控制中心，地面人员通过所观察到的实验情况，可以对预先上载的实验流程进行修改。此时，宇航员需要将装置操作系统临时切换到手动模式对实验进行相应的干预。在每次任务结束后，所储存的实验数据被宇航员带回地面并送往马普学会和俄罗斯高温联合研究所进行分析。

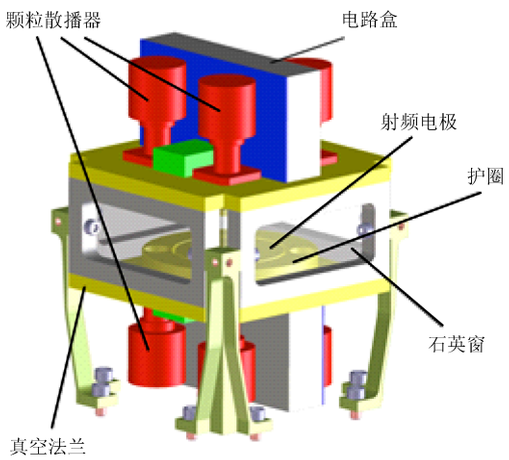

图 3　PK-3 Plus 射频放电装置三维模型

2．PK-3 Plus 实验介绍

下面以 PK-3 Plus 上开展的实验为例，介绍尘埃等离子体中几个典型的物理现象。

三维等离子晶格　PK 系列实验从一开始就是为等离子晶格实验设计的，PK 在德语中是等离子晶格（Plasma Kristal) 的缩写。在 PKE 的实验中，晶格结构仅能在空洞的上方观察到，而在 PK-3 Plus 装置中，在空洞上侧的晶格可以延展到两侧，形成一个具有较大尺寸的晶格系统（图 4 左）。

在实验中，我们采用 2.55 μm 直径的陶瓷颗粒均匀分布在射频放电产生的等离子体中，通过调节气压的方式来融化或生成晶体结构。通过扫描晶格，我们能够观察一个 8×6×4.8 mm^3 的三维空间（图 4 右）。系统初始处于液态（此时系统温度即颗粒动能较高，系统不显现规则结构），当气压下降时，靠近上电极的鞘层厚度增加，尘埃云被挤压导致其上边界下降，

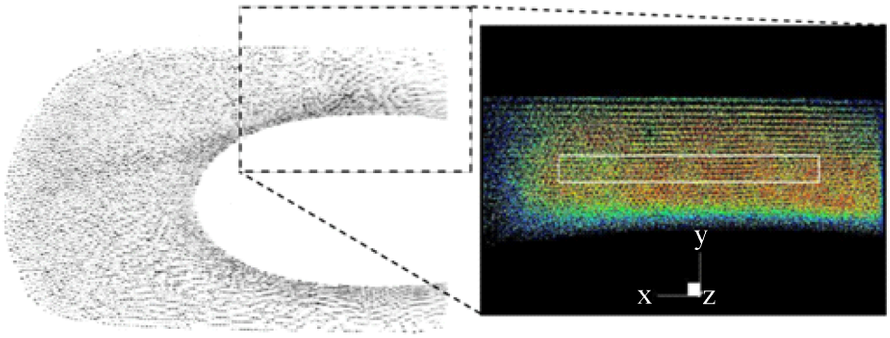

图 4　三维等离子晶格实验。左图显示了左侧一半的复杂等离子体系统（图 5，6 情况类似），黑点即尘埃颗粒。在右图中，颗粒所处的相态由红向蓝颜色标记（处于固态的颗粒被标记为红色，处于液态的颗粒被标记为蓝色）（图来源于 Khrapak et al，PRE 85，066407，2012)

而位于空洞上方的下边界位置基本没有变化，整个晶格结构被压缩，颗粒间距急剧减小，系统的耦合强度（即系统中的颗粒间相互作用势与其动能之比）相应增加。当气压下降超过一个临界值后，系统结晶，形成规则的等离子晶格结构。

这个实验的结果与我们在重力环境下观察到的等离子晶格的融化和结晶过程恰好相反。在地面上重力环境下进行的实验中，尘埃云下半部分悬浮于靠近下电极的鞘层中。当气压降低至一定临界值时，由于离子束流与尘埃颗粒相互作用导致的比内曼不稳定性（Buneman instability)，密度波被自激发。这样的集体波动快传播到整个尘埃云从而融化等离子晶格。相反，在微重力环境下，尘埃云被限制在中心等离子体区域而非鞘层中，因此降低气压并不会导致不稳定性也不会融化尘埃晶格。

传统的晶体学研究，主要使用扫描隧道显微镜（STM）在原子尺度上来研究晶格的表面性质和 X 射线或中子射线衍射技术来研究其内部结构，这些实验都局限于系统的静态结构的研究。使用复杂等离子体系统，可以在动力学的时间尺度上研究三维等离子晶格的形成条件和过程，从而研究“原子”间相互作用对结晶过程的影响。相较于传统的结晶过程需要数小时甚至数天，整个过程在复杂等离子中仅仅需要数十秒钟。使用激光扫描技术，可以轻易地获取晶格内部在结晶过程中的三维结构的演变。除此之外，在复杂等离子体系统中，我们可以通过外加电场或者磁场对晶格施加不同形式和程度的外力影响，从而研究外力对成晶的作用。使用类似的手段，我们也可以反过来具体研究晶体融化的过程和动力学机制。

密度波在复杂等离子体系统中的传播　作为一门交叉学科，复杂等离子体系统被认为是一种软物质（soft matter)，而物质的特殊“软”性最容易通过波在系统中的传播表现出来。在实验中，复杂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的低频尘埃密度波。这种密度波既可以被外加激发信号所激发，比如周期性的外加电场，也可以自激发。如上文所述，微重力情况下，尘埃云被约束在主等离子体区域，要在这样环境中产生自激发波，需要在放电腔中注入极大量的尘埃颗粒。由于尘埃云具有一定的不可压缩性，其两侧被挤压至靠近放电装置墙的鞘层中。图 5 给出了一个在 PK-3 Plus 实验装置中自激发密度波的例子。实验中，在气压非常低的情况下，由于比内曼不稳定性，密度波能被激发。所激发的密度波由中心的空洞横向向两侧传

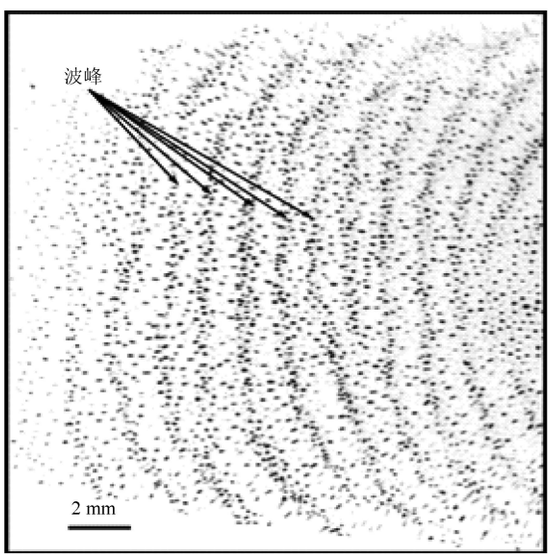

图 5　自激发密度波动实验，图中黑点为波动中的尘埃颗粒

播，其密度波前在实验中可以被很清楚地观察到。

在研究密度波时，波长和频率是两个最重要的参数。这两个参数不仅与局域的等离子体参数有关，而且和等离子中尘埃颗粒的数密度、质量和带电量有着密切的关系。其中，颗粒的带电量以相当快的速度随波涨落，尘埃颗粒对等离子体中的波动也产生巨大的反作用。

如果在实验中加入纵向的交流电压作为外界的激发源，密度波在空洞的上下位置也可以在纵向被激发。在实验中我们发现，当外界激发源的频率与横向的自激发波的频率近似时，两种波产生强耦合，从而形成斜波。此时，集体波动充满整个尘埃云。当激发源的频率远大于自激发波的频率时，斜波消失，两种波独立存在于复杂等离子体的不同位置。

在复杂等离子体研究领域，密度波有时候也被称为尘埃声波，这是一种可以用肉眼直接观察测量的声波。在图 5 中，我们能清楚的看到波峰和波谷以及单个颗粒在波中的运动。通过研究颗粒在波动中的运动过程，可以将声波这种连续介质特有的性质与组成介质的单个颗粒的运动联系起来。利用复杂等离子系统，通过改变不同的实验条件，可以非常直观地研究不稳定性的激发机制以及波动的传播过程。

二元复杂等离子体系统中链结构的形成　链结构的形成作为斑图形成中最具代表性的一种，不仅在物理学同时也在化学、生物学等很多领域是研究的热点。在实验中，我们先将一种直径较大（9.2 μm）的尘埃颗粒撒入等离子体中形成复杂等离子体系统，之后再引入一束直径较小（3.4 μm）的尘埃颗粒。较小的尘埃颗粒在等离子体势场的驱动下穿过由较大颗粒组成的尘埃云运动向装置的中心位置，在穿越的过程中作为背景的大颗粒形成链状结构，如图 6 所示。

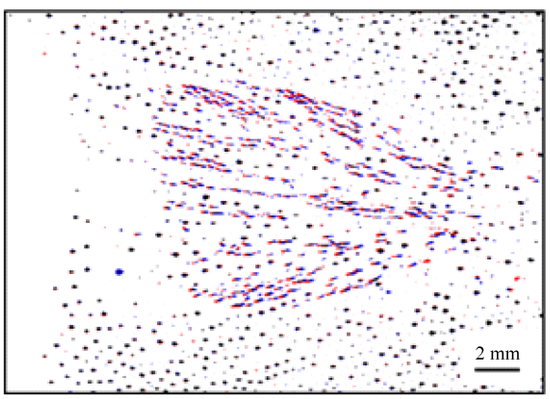

图 6　成链实验

所示图由连续二帧实验图片叠加而成。其中颗粒在第一帧中为红色，第二帧中为蓝色

（图来源于 Jiang et al，EPL 92，65002，2010）

作为二元复杂等离子体系统，不同种的颗粒之间具有非相加性。复杂等离子体中链的形成类似于当外来人群需要穿越拥挤的公共场所时，由于人与人之间的相互避让，会自然形成一个个穿越通道。而不同尘埃颗粒之间的非相加性，正如不同种族人之间由于文化等各种差异，总是自觉的依不同的族群聚集。但是，最近的实验也显示，在适当的条件下，不同颗粒之间是可以混合在一起的，这又像民族融合，在一定的努力下总是可以实现的。

数值模拟显示，当系统由两种不同颗粒组成时，非相加性会导致这两种颗粒分开成不同团簇，物理上的术语是分相（phase separation）。在二元复杂等离子体系统中，非相加性对成链过程有着深刻的影响。在模拟中，大的非相加性参数会减弱链的形成，取而代之的是形成具有一定体积的团簇结构。

在微重力下的试验也证明，成链过程具有记忆效应。当连续在尘埃云中引入两束较小直径的颗粒时，第一束颗粒对第二束颗粒的动力学运动有着很大的影响。当两束颗粒引入的时间间隔足够小时，第一束颗粒离开尘埃云后留下的空洞会加速第二束颗粒的穿越以及成链的过程。

二元系统在复杂等离子体研究中是个非常新兴的子课题，从开展至今不过 3 年的历史，然而其研究的潜力十分巨大。除了以上所提到的斑图的研究，这样系统也可以用来在“原子”层面上研究合金的性质以及晶体的掺杂。其对于相变的研究也具有潜在的重要意义。

3．微重力下复杂等离子体实验的展望

近年来的复杂等离子体实验主要集中在射频放电中的复杂等离子体结构的研究。下一代实验装置 PK-4 将主要研究在直流放电中的复杂等离子体的流体性质。PK-4 装置以 PK-2 装置为雏形，增加了很多革命性的设计（图 7）。首先，PK-4 的放电电极除

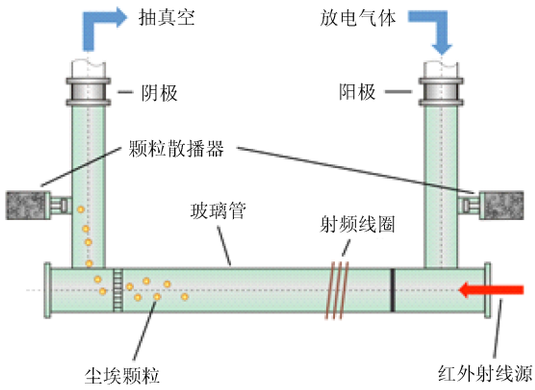

图 7　PK−4 直流放电装置简图

了可以提供传统的直流放电，还可以提供频率高达 1000 Hz 的交流电场，从而可以将尘埃颗粒限制在玻璃管的中心。其次，PK−4 具有自清洁功能。使用氧、氩混合气体进行等离子放电，可以将实验后装置中剩余的尘埃颗粒刻蚀掉。除此之外，PK−4 装备有红外射线源，可以通过光学方式操纵颗粒的运动。PK−4 项目由欧洲宇航局（ESA）和马普学会等参与合作，已进入后期测试阶段，计划于 2014 年送入国际空间站的欧洲哥伦布舱。

在 PK−4 项目之后，PlasmaLab 项目也已经进入了准备阶段。PlasmaLab 由两个放电腔组成，第一个为圆柱形射频放电装置（Zyflex chamber），直径约为 30 cm，高约为 25 cm，内部空间远大于之前几代空间装置，值得一提的是，其两电极间距离和电极上的信号可根据实验的具体需要自动调节。第二个装置更是具有革命性的设计（图 8），其放电腔是直径约为 20 cm 近球形装置 （Dodecahedron chamber），内部装有 12 个电极，每个电极都有一个独立的频道驱动，使用不同的电极组合和电压设置，可以形成不同的放电位形。将近球形装置用于复杂等离子体实验，可以调节尘埃颗粒间的相互作用势，使系统更接近真实的原子系统。在一定的设置下，放电中心将从装置中心迁移到装置边缘靠近壁的地方，理论上可能可以避免空洞的形成。图 8 给出了微重力环境下开展的尘埃等离子体实验的年表。

4．小结

复杂等离子体实验是一项新兴的研究课题，近几年来有了十分迅速的发展。当今的研究主要集中在三个方面：首先是等离子体与尘埃颗粒的相互作用，包括颗粒在不同等离子环境下的充电过程，离子流与带电尘埃颗粒的相互作用等基本的复杂等离子体的特性的研究；其次是相关工业应用的研究，包括如何能够高效地清除放电设备内尘埃颗粒污染的各种实用手段；最后是利用复杂等离子体作为一个模型系统，在“原子”层面上研究传统物质的各种物理性质。尤其是最后一个方面，由于复杂等离子体系统可以通过调节所在等离子体环境的气压而存在于不同阻尼程度的环境中，进而研究从牛顿动力学（低阻尼系统，由带电颗粒间相互作用为主导）到布朗动力学（下转 21 页）

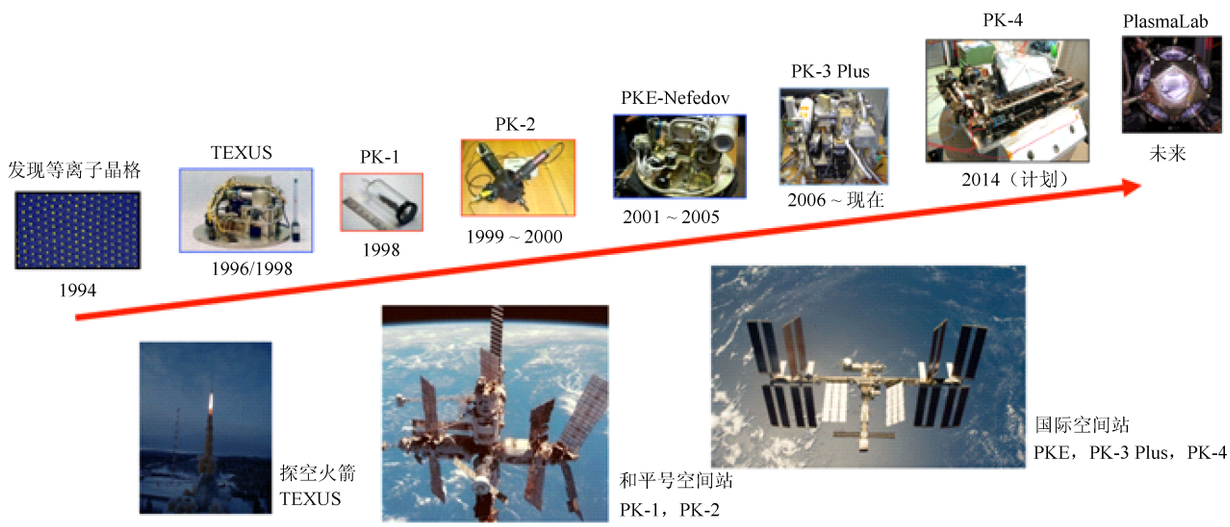

图 8　微重力环境下复杂等离子体实验的发展和展望