

# 等离子物理的前沿和展望

朱士尧

以物质第四态作为研究对象的等离子体物理学是一门正在蓬勃发展的新兴学科。尤其是最近十几年中，等离子体物理在许多方面都取得了重要进展，在国际科学界越来越受人瞩目。人造卫星等航天器为空间物理和天体物理研究提供了空前未有的先进探测实验手段；也为等离子体物理学提供了更广阔的研究领域；前景十分诱人的受控核聚变研究极大地推动了等离子体物理学的发展；探索新颖的等离子体高能加速器近年来已成为一个相当引人注目的前沿课题；在当代高技术领域内，等离子体刻蚀以及利用等离子体与固体表面相互作用来发展新形材料等方面也都显示了光明的前景。本文将简要地介绍等离子体物理学的重要研究领域，包括这些领域中的重要进展以及正在探索研究的一些前沿课题。

## 一、耐人寻味的“宇宙三级跳”

尽管在我们生活的环境中，除了雷雨季节壮观的闪电和只有在北极附近才能看到的瑰丽极光之外，地球上几乎没有等离子体，这是因为等离子体的存在条件与人类生存条件是不相容的。然而，你也许没有想到，茫茫宇宙中竟然有99%以上的物质都是等离子体！阳光普照，烈日炎炎，质量巨大的太阳温度极高，那里的物质无疑都已电离，只能以等离子体状态存在。宇宙间太阳这样的恒星何其多！还有白矮星、中子星以及大量的气态星云和大量的星际物质都是等离子体。日地空间也几乎到处都充满了等离子体，包括太阳风、范艾伦辐射带、磁层和电离层。既然宇宙间充满了等离子体，那么整个宇宙无疑地都是等离子体物理学的研究对象。人造卫星、宇宙飞船用于空间物理研究带来的重要发现使我们对宇宙的传统看法发生重要的变化。千百年来，人类一直是根据光学观察的结果来认识宇宙的，我们称之为“可见宇宙”。最近十年来，空间研究已打开了整个电磁波谱，包括红外区、紫外区、X射线区和 $\gamma$ 射线区。其中X射线区和 $\gamma$ 射线区尤其重要。因为我们观察到的宇宙X射线和宇宙 $\gamma$ 射线都是宇宙中电子能量大于 $10^6\text{eV}$ 的磁化等离子体发射出来的。因此，我们有理由提出“等离子体宇宙”的概念。

等离子体宇宙模型与传统的可见宇宙模型有很大的区别，而且等离子体宇宙概念能够揭示更深层次的更丰富的宇宙信息。两者的关系在一定程度上可以用

下面的例子作类比。可见光使我们看到人的手腕既灵活自如又很有力量，然而X光照片却能揭示出手腕的复杂结构，告诉我们手腕为什么能既灵活自如又很有力量。同样，太阳系的可见光图象给我们提供了天体的表面信息，而对太阳系等离子体的研究则能告诉我们星际空间和太阳内部的结构。X射线区和 $\gamma$ 射线区要比可见光区宽1000倍以上，可以预料随着科学仪器的发展；宇宙等离子体辐射的X射线和 $\gamma$ 射线一定会提供远远超过可见光提供的信息。从可见宇宙模型向等离子体宇宙模型的过渡，在某些方面类似于三百年前由地心说宇宙观向哥白尼的日心说宇宙观的过渡，毋庸置疑，伽里略的望远镜起了重要作用。其实古希腊天文学家早在哥白尼之前2000多年就曾提出过日心说宇宙观，可那时没有望远镜而无法证明。当代宇宙飞船极大地拓宽了人类视野，带来了大量重要信息，为提出等离子体宇宙模型奠定了基础。在过去十年里已经用装在宇宙飞船上的探测仪器研究了水星、金星、木星和土星的磁层。当旅行者号宇宙飞船掠过木星时，向地面传送的探测数据表明木星旋转时向外辐射出重离子流等离子体，它是由其卫星 $I_4$ 的剧烈活动喷射出来的。从现在起再用十年左右的时间利用宇宙飞船可望基本完成对太阳系等离子体的初步探测。旅行者号宇宙飞船将首次实地测量天王星和海王星的磁层。先锋号或旅行者号宇宙飞船还将直接探测星际物质和星系间宇宙射线。

在理解和分析观测到的空间和天体等离子体物理现象中；理论研究占有相当重要地位。目前比较引人注意的理论研究课题包括：日地空间等离子体整体行为的研究。大家知道，太阳活动对地球会产生重要影响，而这种影响是通过太阳风-磁层-电离层-低层大气之间的一系列耦合过程来实现的。关于星体磁场的起源和演化，关于宇宙高能粒子的加速机制的研究以及等离子体宇宙的演化等。

综上所述，等离子体空间尺度的变化范围极大，可达 $10^{22}$ ，分为三个区域，每个区域的跨度均为 $10^9$ ，这种现象被称之为“等离子体宇宙三级跳”。实验室等离子体尺度 $\sim 10^{-1}\text{m}$ ，磁层等离子体空间尺度 $\sim 10^6\text{m}$ ，星际云的空间尺度 $\sim 10^{17}\text{m}$ ，哈勃距离 $\sim 10^{26}\text{m}$ 。耐人寻味的是广阔无垠的宇宙中不同区域内的等离子体基本性质却是相同的。这就是说，我们对于实验室等离子体长期的研究经验和成果可以应用到几何尺寸要大二

十多个数量级的宇宙等离子体。近年来还发现在宇宙等离子体中存在电流回路，电工电子学中最基本的柯希霍夫定律在那里依然适用。实验室等离子体的箍缩效应在宇宙等离子体中同样起着重要作用。

## 二、创造人间的小太阳

### ——并非普罗米修斯的神话

这是一个古老而美丽的希腊神话。普罗米修斯 (Prometheus) 为了造福人类，他用茴香管盗来了太阳上的火种，给人类带来了光明，使人类从藏身的洞穴中走出来，开始了新的生活。此事触怒了天神宙斯，他把普罗米修斯绑在高加索山崖上，每天让恶鹰啄吃他的肝脏，啄伤的肝脏夜间恢复原状，白天恶鹰再来啄吃，使他在痛苦中煎熬了三万年。这是古希腊人对于原始社会中火的发明的艰苦过程的一种不自觉的艺术加工。在希腊的文学作品中他便成了一个为了人类文明而不畏强暴受到宙斯残酷迫害的英雄。马克思也在《博士论文》序中称之为“哲学的日历中最高尚的圣者和殉道者”。

在现代文明社会里，阳光普照大地，万物生机勃勃。人类虽然无须再为寻觅火种而操劳，却不得不为将来面临的能源枯竭而忧虑。据估计，地球上经过成千上万年形成的石油、煤、天然气等燃料再经过一百年左右就差不多用完了。为此，世界各国都在投入相当的人力财力去探索各种新能源。从五十年代开始登上世界能源舞台的核电站显示了巨大的威力。只要燃烧极少的核燃料就可获得巨大的能量。但是，这种核电站是以原子核的裂变反应为基础的，产生的放射性废物处理比较困难，而且主要核燃料铀的储量相对于其它元素来说并不丰富，开采和提炼又十分困难。因此原子核裂变能并不是最理想的能源。唯有一种完全崭新的能源——原子核的聚变能才是人类未来最理想的新能源。它的物理基础是氘和氚在极高温下发生聚变核反应生成氦。它的突出优点是原料储量极其丰富。自然界中的氘以重水的形式存在于海水之中。每公斤海水含氘 0.03 克。地球上的海水约有  $10^{21}$  公斤，含氘  $3 \times 10^{16}$  公斤。目前全世界能源消耗水平每年  $2 \times 10^{19}$  焦耳，只需燃烧  $10^6$  公斤氘就够了。可见地球上的氘够用  $3 \times 10^{10}$  年之久！而地球的年龄也不过 50 亿年，人类历史不过几百万年。可见，核聚变能源一旦实现，人类从此再也不必为能源问题而操心了。另外，燃烧每单位质量的燃料释放出的能量非常大，“燃烧”1 升海水获得的能量与 300 升汽油相当。而且聚变反应的产物几乎没有放射性污染。因此核聚变能源的前景十分诱人。其实，自从 1929 年阿特金森 (Atkinson) 和豪特曼斯 (Houtemans) 提出太阳的能量是由原子核的聚变反应释放出来的假说之后，就曾梦想过在地球上也通过类似的方法来获取能量。这就是说要创造一个

人间小太阳。虽说这样做决不会象普罗米修斯到太阳去盗火而要受三万年的皮肉之苦，但无论如何是要付出艰苦的劳动和长期的探索奋斗。1934 年，奥立芬特 (Oliphant) 在实验室里实现了第一个核聚变反应即氘-氘反应。1942 年，施莱伯 (Schreiber) 和金 (King) 首次实现氘-氘聚变反应。1945 年研制成原子弹，其后不久又成功爆炸了氢弹。其实氢弹本身就是猛烈的核聚变反应，不过它无法控制，因而它只能是一种威力无比的武器而不能成为可供利用的能源。尽管如此，这件事本身给科学家带来了相当大的鼓舞。五十年代初期，美国、苏联、英国等国各自秘密地开展了受控核聚变研究。当时他们满怀信心制订了宏伟计划。然而很快就遇到了巨大的甚至一度被认为是不可克服的困难。例如等离子体中出现了各种各样的不稳定性以及致命的“玻璃扩散”，高温等离子体刚刚产生便很快消失得无影无踪！从五十年代后期开始便不得不转向高温等离子体物理学的基础研究。

实现受控核聚变的条件十分苛刻，概括起来是两条即极端的高温 and 充分的约束。也就是人们常说的劳逊条件 (Lawson Criterion)，对于氘-氘反应，必须满足  $T_i \geq 10 \text{keV}$ ,  $n\tau \geq 6 \times 10^{13}$  厘米<sup>-3</sup>·秒。对于氘-氘反应的要求更苛刻。式中  $T_i$  是等离子体中的离子温度，10keV 的动能相当于等离子体宏观温度 1 亿度 K。n 为粒子密度， $\tau$  是等离子体约束(存在)时间。要在地球上获得如此高的温度谈何容易！况且任何实验容器都无法承受如此高的温度。太阳及其它恒星是靠巨大质量的引力来约束等离子体维持聚变核反应的。这在地球上是不可能的。在实验室内约束高温等离子体的方法有两种：利用磁场和利用等离子体本身的惯性。从这个意义上说，聚变等离子体可分为两大类，磁约束等离子体和惯性约束等离子体。目前在磁约束核聚变方面进展最快最有希望的途径是托卡马克装置 (Tokamak)，其次是仿星器 (Stellarator) 和磁镜装置 (Mirror)；惯性约束方面则是激光核聚变。

自七十年代以来核聚变研究在世界范围内再次出现热潮，尤其是磁约束核聚变近年来取得重大进展。1986 年，在美国的大型托卡马克装置 TFTR 的 Super-shot 放电创造了离子温度的世界纪录，高达 20keV，远远超过劳逊条件的要求。约束性能也有很大改善。近来，科学家们用劳逊判据  $n\tau$  值与离子温度  $T_i$  的乘积来判断聚变研究的进展。 $n\tau T_i$  被称为聚变品质因素。目前已达到  $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ ，离聚变点火只差 20 倍。 $n\tau T_i$  值在最近三年里提高了 3 倍，在过去十年里提高了 100 倍，在过去的二十年里提高了 1000 倍，这是十分令人鼓舞的。当前在核聚变等离子体领域内的主要前沿研究课题包括如下几个方面：进一步改善等离子体的约束性能，尤其是对“H 模约束特性”的深入研究；探索新的加热方法和机制，除了相当成熟

的高能中性粒子注入方法之外,探索各个频率范围的波加热机制;研究等离子体中的反常输运过程和涨落现象;研究抑制宏观不稳定性尤其是抑制危害性较大的大破裂不稳定性;还包括对杂质行为的研究及其控制方法的研究,探索新的更佳磁场位形等。

### 三、孕育着一代新颖的等离子体高能加速器

高能物理的发展离不开加速器。1930年第一台加速器诞生以来,几乎每十年加速器的能量增加一个数量级。当代高能物理的前沿研究对加速器的能量要求已高达100GeV(电子直线对撞机)。根据目前的加速器技术,加速梯度最大为20MeV/m,为了获得如此高的能量,这种巨型高能加速器将长达50公里以上,这在技术上是相当复杂的,投资也是惊人的。今后随着高能物理的进一步发展,还会提出更高能量的要求。如果继续增加电场,加速器会遇到击穿问题,这就是说必须建造远大于50公里的超巨型高能加速器。无论是技术的难度还是巨额资金的耗费都是可想而知的。美国最近获准建造一台超级的超导质子-质子对撞机(SSC)其周长达84公里,投资32亿美元,计划在6年内建成。要建造下一代能量更高的加速器其根本出路在于探索新颖的加速器原理。关键在于既要提高电场强度,又要避免击穿问题。

等离子体物理学家在这个关键问题上能给高能物理学家助一臂之力。1979年,等离子体物理学家道逊(Dawson)提出了等离子体高能加速器的新思想。在等离子体中可以获得很强的电场而不会击穿(因为它本来已经电离),最大可达到1GeV/m,比传统加速器大约高三个数量级。最近几年已提出了若干种等离子体加速器的方案。一种叫等离子体拍波加速器(PBWA),两束频率相近的激光在等离子体中同时传播,激起等离子体纵向振荡。在一定条件下,注入的相对论性粒子便可以在相当长一段距离内与等离子体波的电场保持同相,从而不断加速。由于电场相当强,便可在较短距离内将电子加速到极高能量。另一方案叫等离子体尾场(wake-field)加速器(PWFA)。当两股相对论性电子束先后高速穿过等离子体时,第一股电子束通过等离子体时在后面流下了一个等离子体振荡的尾场。紧跟在后的第二股电子束便可以“骑”在等离子体波上得到加速。总之,等离子体高能加速器是近年来才提出来的新概念,为等离子体物理学开辟了一个全新的研究领域,可能具有光辉的前景。

除了上述三个方面之外,低温等离子体(温度在10<sup>4</sup>K以下)的研究亦日益受到重视。尤其是利用等离子体与固体表面相互作用形成性能优良的新颖材料,以及等离子体薄膜处理和刻蚀等都具有广阔的前景。此外,凝聚态等离子体的研究以及非中性等离子体的探索研究也都在向纵深发展。

## 分形凝聚和物质生长模型

黄 灼

无序、不可逆的生长过程是自然界中一种极平常的行为;例如树木、珊瑚的生长,灰尘和云块的聚结,人体肿瘤细胞的繁殖,雪花及各种晶体材料的形成,这类过程统称为生长过程,一般来说生长过程是非常复杂的。我们知道,生长就是物质的一种发展过程,普通物质最后的形成必然与它发展过程中的历史状态有着紧密的关联;因此,它是一种有记忆的非马尔可夫过程。由于这种过程包含着复杂的动力学行为和非平衡的统计规律,不可能简单地写出它的配分函数或生成函数,所以长期以来人们无法对它进行深入的研究。近年来(从1981年起)在这个

领域内有了一些突破,主要是发现生长的物体具有动力学标度律,它的生长结构形状在一定的宏观条件下与分数维数有关。一般称为分形凝聚。这样一来,分形凝聚过程就成了近年来统计力学中一个非常活跃的课题。

生长过程大致可分为三类:第一类是有规则的缓慢生长过程(平衡态),例如单晶的成长等。第二类是稳态的形态生长,这类生长给出一定的花纹结构,例如雪花、树枝状晶态结构等。第三类是远离平衡态的无序分维生成,它具有标度不变性,例如天空中灰尘及云块的凝聚,电解溶液时金属材料的凝集等。在本文中我们主要介绍第三类生长过程。

### (一) 生长模型

由于自然界中存在着种类繁多的生长过程,因此必须引进各种不同的生长模型来描述它们。所谓不同的生长模型就是指物质在生长时服从不同的生长规律。这里简单介绍几种模型。