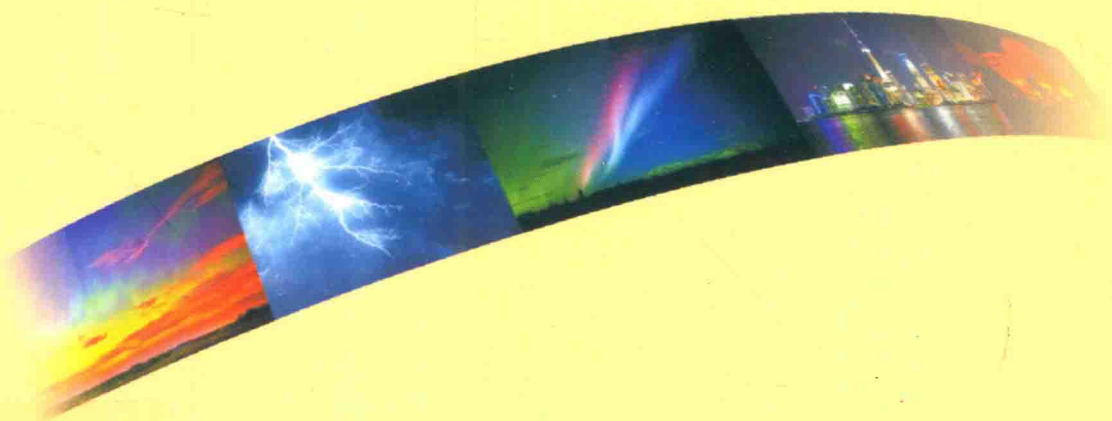


等离子体自传

沙振舜 编著

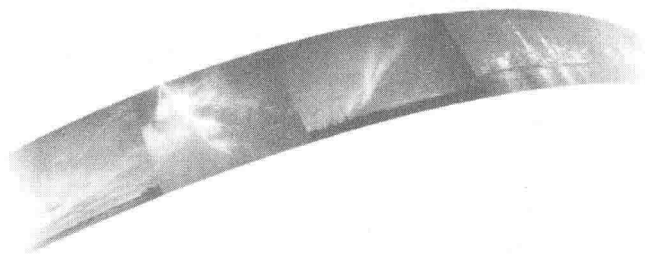


南京大学出版社

本书得到江苏省物理品牌专业项目资助

等离子体自传

沙振舜 编著



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

等离子体自传 / 沙振舜编著. —南京: 南京大学出版社, 2016. 11

ISBN 978 - 7 - 305 - 17906 - 8

I. ①等… II. ①沙… III. ①等离子体—普及读物
IV. ①O53 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 277227 号

内容简介

本书用拟人的写法、第一人称的口吻, 阐述等离子体的基本性质、研究历史、在若干领域的重要应用, 以及发展前景, 全书共 16 章。本书作为课外读物, 用以增加学生的科学知识, 开拓学生的科学视野, 提高科学素养。本书叙述深入浅出, 具有趣味性, 力图做到通俗易懂; 并且精选一些插图, 做到图文并茂。

本书主要对象为中学生和大学一、二年级学生, 也可供对等离子体感兴趣的其他读者参考。

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093

出 版 人 金鑫荣

书 名 等离子体自传

编 著 沙振舜

责任编辑 罗 凡 沈 洁 编辑热线 025 - 83593962

照 排 南京理工大学资产经营有限公司

印 刷 南京玉河印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 11 字数 256 千

版 次 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 305 - 17906 - 8

定 价 25.00 元

网 址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信号: njupress

销售咨询热线: (025)83594756

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

序

这本书是写给青少年朋友的！我为什么要写这本书，大概有以下几个原因。

我年届八十，在半个世纪的教书生涯中，有很长一段时间从事等离子体实验教学与研究，写过包含等离子体实验的大学教材，也研制过等离子体放电管和等离子体实验组合仪，供国内院校开设实验使用。在这个过程中，我深感等离子体科学技术博大精深，应用日益广泛，具有相当广阔的前景，是当今科技研究的前沿。这些年来，我对等离子体产生浓厚兴趣，也积累了一些关于等离子体的知识与经验，欲与大家分享，正所谓“老骥伏枥，志在千里”。

等离子体科学与技术发展迅速、应用面广、前途远大，将来大有用武之地。然而，不少人对它还很陌生。对学生来说，为了以后大显身手，具备一定的等离子体知识很有必要。我在这里将这本科普小书奉献给大家，也是抛砖引玉，让青少年掌握初步的等离子体知识，了解等离子体学科的重要性及其应用的广泛性，希望青少年朋友对等离子体产生兴趣，走上科学之路，为祖国做出卓越贡献。

目前关于等离子体的论文、教材、专业图书等汗牛充栋，然而适合青少年阅读的科普书籍为数不多。本人见过的有汪茂泉著的《课余谈物质第四态》，写得很好，是写给青少年看的，我受此启发，萌生写作的念头。

前几年，我写过一本科普书，书名为《最美丽的十大物理实验》，目的在于提高中学生综合素质、培养科学素养，出版后，据说反映不错，这也鼓舞我从事科普创作，想在我有生之年，为青少年提供点“精神食粮”。

本书用拟人的写法、第一人称的口吻，述说等离子体的基本性质、研究历史，以及在若干领域的应用，这样写是为了增加亲切感和可读性，引起读者兴趣。全书避免运用过于艰深的数学，也不涉及专业性过强的等离子体理论，叙述深入浅出，可使读者得到一定的等离子体知识。本书力图做到通俗易懂，并且精选一些插图，做到图文并茂，适合中学生阅读。书中对极个别生疏、难懂的名词术语做了注释，以帮助理解。

在写作本书的过程中，我慕名到南京苏曼等离子科技公司，在总经理万京林陪同下参

参观了该公司的科罗纳实验室。在这所国内著名的低温等离子体研发中心,我看到形形色色的等离子体发生器,以及应用于各行各业的等离子体设备,感受颇深。这丰富了本书的内容。此外,谨向苏曼公司总经理万京林和董事长万荣林表示衷心感谢。

我要感谢南京大学物理学院吴小山副院长、院长助理应学农、基础实验教学中心主任周进教授、南京大学新闻传播学院韩丛耀教授、南大出版社王伟社长和吴汀、沈洁两位编辑在本书写作与出版过程中给予的支持和帮助。

我要感谢我的妻子孔庆云对我始终如一的支持,我的孙女沙润钰和我的孙子沙云飞作为本书最初的读者看了本书的初稿,做了是否适合中学生阅读的试验,此外,沙明和沙星帮助输录书稿、描绘插图,为本书做出贡献,我在此一并表示感谢。

我还要感谢参考文献中的所有作者、我的同行、书友以及互联网,我从中吸取了写作的营养。

由于等离子体科学是一门发展中学科,加之本人水平所限,错误和不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2016年5月1日于南京

目 录

引 子	1
第一章 我的身世——等离子体基本概念	2
一、我的名字叫等离子体	2
二、我的家族	6
三、我的生成	7
四、液相等离子体	18
五、微等离子体	19
第二章 我的伯乐——谁发现了我	24
一、气体放电的研究	24
二、朗缪尔——“等离子体之父”	31
第三章 我的属性——等离子体参量	34
一、等离子体密度	34
二、等离子体温度	34
三、德拜屏蔽和等离子体振荡	36
四、等离子体鞘层	38
五、等离子体的空间和时间尺度	39
六、等离子体判据	39
第四章 我的体检——等离子体诊断	41
一、探针技术	41
二、等离子体的光谱诊断法	50

三、等离子体的质谱诊断法	54
四、等离子体的微波诊断法	58
第五章 对我的理论和实验研究	60
一、等离子体的理论研究	60
二、等离子体的实验研究	63
第六章 天生我材必有用——等离子体应用概述	66
一、在能源领域的应用	67
二、等离子体发光特性的应用	68
三、在新材料和加工领域的应用	68
四、环境领域的应用	69
五、宇宙领域的应用	70
六、在国防上的应用	70
第七章 我来拯救人类——等离子体在能源领域的应用	73
一、能源危机	73
二、开发新能源	74
三、核聚变反应	75
四、两种约束方法	76
五、托卡马克反应堆技术	79
第八章 磁流体发电——等离子体在电力工业中的应用	81
一、什么是磁流体发电	81
二、磁流体发电机结构原理	82
三、霍耳效应	84
四、磁流体发电研究简史	86
五、磁流体发电的优点和前景	87
第九章 后来居上——等离子体电视与平板显示	89
一、传统电视机的兴衰	89
二、平板电视	91
三、等离子体显示(PDP)	93

第十章 梦幻之光——形形色色的气体放电灯	96
一、照明的历史变迁	96
二、气体放电灯的结构	97
三、常见的气体放电灯	98
四、金属卤化物灯	104
五、等离子体发光球	106
六、微波等离子灯	109
第十一章 为国家建设做贡献——等离子体的工业应用	112
一、等离子体切割金属	112
二、等离子体焊接	115
三、等离子体喷涂	117
四、等离子体冶金	118
五、等离子体工业应用前景	121
第十二章 插上腾飞的翅膀——等离子体在微电子工业的应用	122
一、去胶	123
二、显影	124
三、刻蚀	124
四、淀积	126
五、阳极氧化	128
第十三章 我与表面的亲密接触——等离子体表面改性	129
一、什么是材料表面改性	129
二、专家访谈录	130
第十四章 医生的好帮手——等离子体在生物学上的应用	140
一、生物学材料和人工器官	140
二、等离子体灭菌	143
第十五章 我的特异功能——等离子体在国防工业上的应用	146
一、何谓等离子体隐身技术	146
二、常见的等离子体隐身技术	149

三、如何具体实施等离子体隐身	150
四、等离子体炮(电热炮)	151
第十六章 空气净化——等离子体的环保应用	154
一、环境污染的严峻形势	154
二、利用非平衡等离子体净化空气	156
三、大气压非平衡等离子体源	157
四、电厂污染物治理	158
五、汽车发动机废气处理	159
六、等离子体处理挥发性有机污染物(VOCs)	160
结束语——我的前途灿烂光明	163
参考文献	166

引 子

各位看客：

目前，等离子体电视已在各大商场上市，并将逐渐进入寻常百姓家。这种新颖电视的亮度和清晰度，比普通显像管电视机要高好几倍，颇受人们青睐。如果您的亲戚朋友想买等离子体电视，问你什么是等离子体时，您该如何回答呢？这本小书给您介绍一点关于等离子体的基本知识，题名为《等离子体自传》。欲知详情如何，且看下文分解。



图 0-1 等离子体电视

第一章 我的身世

——等离子体基本概念

一、我的名字叫等离子体

开宗明义第一章,我来介绍我的身世。我的名字叫等离子体,英文名字叫“plasma”,它来自希腊语“πλάσμα”的译音,与“血浆”同音,所以中国台湾把我叫作“电浆”,在中国大陆则把我称作“等离子体”,早年也曾经译作“等离子区”,俗称“物质第四态”。不管怎么叫法,反正我就是我,是不同于固态、液态、气态的物质聚集态。为什么称作物质第四态呢?那就从我的形成来看吧!

也许有的人对我不大熟悉,然而,我可是无所不在的啊!远在天边,近在眼前。在宇宙中,99%是我(图1-1),在地球上虽然天然等离子体不多见,人造等离子体却不少。夺目的闪电、壮丽的极光是地球上的天然等离子体辐射现象。炽热的火焰、飞机尾迹云^①(图1-2)、火箭发动机的燃气、五彩缤纷的霓虹灯、柔和的日光灯、耀眼的电弧(图1-3)、气体放电激光器(图1-4)、等离子体电视机中都有我的身影,这些都是人造的等离子体。



图1-1 星系——巨大的聚变反应堆

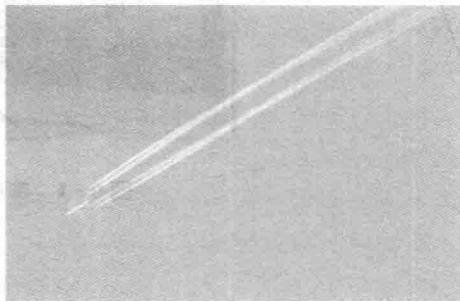


图1-2 飞机尾迹云

^① 尾迹云:即俗称的“飞机拉烟”,喷气式飞机在高空飞行时,机身后边出现的一条或数条长长的“云带”,是飞机排出来的废气与周围环境空气混合后,水汽凝结而成的。



图 1-3 直流电弧等离子体发生器

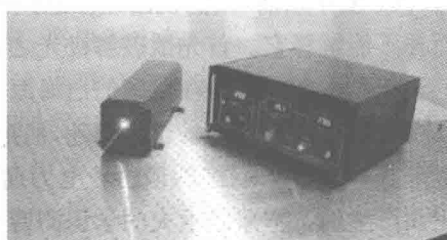


图 1-4 气体放电激光器

等离子体是性质各异、各种各样的。下面介绍人们能看到的大气层中的等离子体现象。例如,瑰丽的极光(图 1-5)是最迷人的大自然奇景之一,理所当然地会吸引人们的注意。它似五颜六色的光流,又似一条发光的银河。有时它像红色的绒幕飘忽于蓝天,有时又像巨大的光柱悬在空中,色彩绚丽,姿态万千,使人如临仙境。啊,壮观的极光!时而如金戈铁马奔涌而来,时而似落花流水悄然逝去,变幻无穷。怪不得有人惊叹:极光,你怎么可以这样美!

关于这神秘的极光,有着许多传说:古人认为这是“美丽少女逝世后绚丽的灵魂”,或是“鱼群畅游于北冰洋时,鱼鳞反射皎洁月光而成”。伽利略则赐予这种神奇的自然现象一个美丽的名字,以黎明女神的名字“Aurora——欧若拉”为它命名。

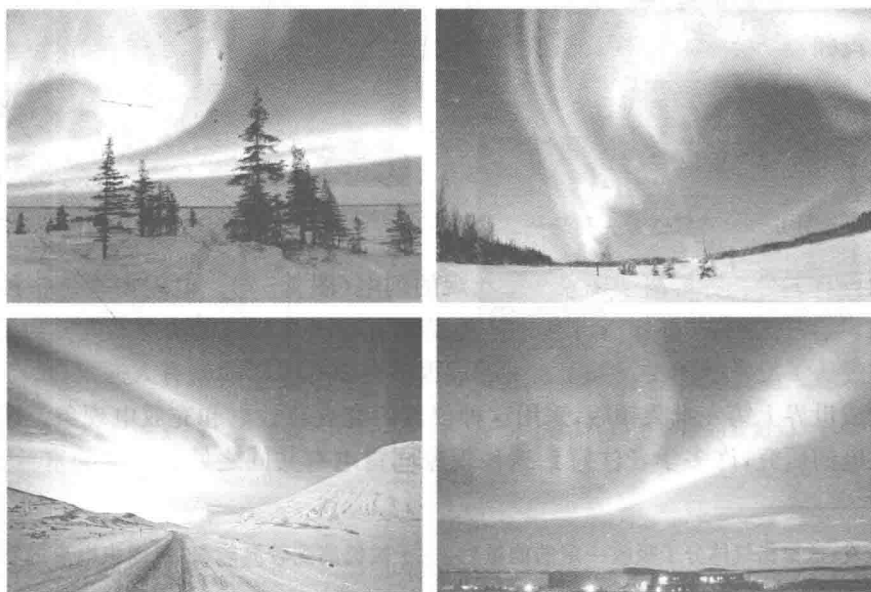


图 1-5 灿烂、奇幻美妙的极光(组图)

2000 多年以前,人们就已经注意到极光了。尽管古代人们已注意到这种奇异现象,然而并不能解释它。首先欲破解极光之谜的,是俄国著名的科学家罗蒙诺索夫(图1-6),他的幼年和少年时代是在俄国的白海海滨度过的。那里经常有极光出现。他从少年时代就对夜空中的此种奇妙景象感兴趣,他把有些极光的形状画下来,并把有关极光的现象记录下来。1753年,他在《谈谈由于电力而产生的空气现象》论文中指出,极光是由于电的作用而产生的。罗蒙诺索夫的学识渊博是惊人的,他是俄国历史上一位卓越而伟大的科学家。他对物理学、天文学、化学、哲学、文学等都有建树,正像别林斯基赞誉的那样:“他仿佛北极光一样在北冰洋岸发出光辉,光耀夺目,异常美丽。”

现在从物理学的观点来看,极光是怎样产生的呢?现代的科学理论认为,极光同太阳活动、地球磁场及高空空气密度有关。大家知道,太阳不断地进行核反应,有大量的带电粒子进入宇宙空间,这些粒子以极高的速度向地球飞来。在地球磁力的作用下,这些粒子集中在南北极附近,使大气激发^①和电离^②,形成稀薄的等离子体,并辐射出明亮的辉光,这就是极光。也就是说,极光是高空大气中的一种电磁扰动现象,是由地球周围的大规模放电造成的,是一种等离子体。



图 1-6 罗蒙诺索夫画像



图 1-7 划破夜幕的闪电

下面再看看另一种等离子现象——壮观的闪电(图1-7)。电闪雷鸣是一种常见的自然现象。远古,人们并不知道雷电的起因,以为是雷公电母施的魔术。人类为了弄清雷电的本质经历了漫长的历史。关于雷电的成因早在 200 多年前就有人探索过。1746 年,科学家建成世界上第一批莱顿瓶,采用这种仪器研究火花放电和充放电现象。通过对空气火花放电的研究,许多学者注意到这种现象同雷电有共同之处。美国的富兰克林(图

① 激发:这里指气体分子吸收一定的能量后,电子被提高到较高能级,但尚未电离的状态,称为激发。

② 电离:当物质被加热到足够高的温度或其他原因,原子中的外层电子摆脱原子核的束缚成为自由电子。电子离开原子核,这个过程就叫作“电离”。

1-8)和俄国的罗蒙诺索夫两人几乎同时用实验证明雷电是大气中正负电荷强烈放电的现象。他们把风筝送上高空,那里云中的电荷沿着潮湿的棉线进入室内,棉线同莱顿瓶^①(图1-9)相联。在雷电来临之前,他们就发现莱顿瓶产生火花放电,从而证明雷电是一种空间放电现象。20世纪,科学家对雷电又有了新的认识:闪电是等离子体,是物质存在的第四种状态。



图1-8 富兰克林像

花开两朵,各表一枝。下面谈一谈人造等离子体。日常生活中看到的日光灯和霓虹灯(图1-10)里就有人造等离子体。

当夜幕降临的时候,人们沿着城市的街道散步,就可欣赏到迷人的霓虹灯广告。在大商店的橱窗里,在高楼大厦的墙面,一幅幅霓虹灯图案发出艳丽的光彩,像神奇的画笔勾画出美丽的画卷。

霓虹灯为什么会发出如此绚丽的光辉呢?因为霓虹灯里的气体是等离子体,霓虹灯实际上是一种冷阴极放电管。霓虹灯是这样做成的:将玻璃管弯成一定形状,抽掉管内的空气,再充入少量的特殊气体,然后在玻璃管两端封上电极,接上1万伏左右的电压(电流极小),管内气体在很强的电场下产生电离,形成等离子体,等离子体是发光的,不同的气体发出不同颜色的光。经过巧妙的设计,霓虹灯就能形成一幅美丽的图案。

有的看客可能会问:霓虹灯为什么会发出五颜六色的光呢?让我来告诉你。原来,在霓虹灯管内充入的气体不同,发的光颜色就不同。如充入氖气,就发鲜艳的红光;充入水银蒸气,则发悦目的绿光;充入氙气,则显迷人的紫光;充入氦气,就显艳丽的黄光;那么,如果充入氢气呢?就会发出暗红色的光。

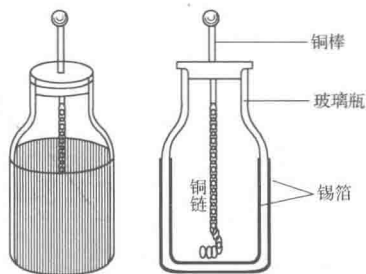


图1-9 莱顿瓶



图1-10 华丽的霓虹灯

^① 莱顿瓶:就是最初的电容器,它是一个玻璃瓶,瓶里瓶外分别贴有锡箔,瓶里的锡箔通过金属链跟金属棒连接,棒的上端是一个金属球。由于它是在莱顿城发明的,所以叫作莱顿瓶。

二、我的家族

我们等离子体家族是很庞大的,我的兄弟姐妹可真不少,关系复杂,对人类生存起着举足轻重的作用。等离子体家族成员彼此之间也有许多差别。所谓“物以类聚,人以群分”,这些差别导致等离子体有多种分类方法。

1. 按等离子体温度分类

按照等离子体的温度差别,可分为高温等离子体和低温等离子体。

高温等离子体是指粒子温度在 $10^6 \sim 10^8$ K 之间的等离子体,产生这类等离子体需要很高的能量,并且具有高的电离度。如太阳、核聚变和激光聚变等产生的等离子体均属于高温等离子体。

低温等离子体是指粒子温度从室温到 3×10^4 K 左右的等离子体。低温等离子体按重粒子温度水平又可分为热等离子体和冷等离子体。

(1) 热等离子体是指低温等离子体中重粒子温度在 $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ K 的等离子体,其电子温度接近重粒子温度,达到热力学平衡^①或局部热力学平衡状态,可以认为具有统一的热力学温度,这类等离子体被称为热等离子体。在材料加工领域广泛应用的电弧等离子体、高频等离子体等均属于热等离子体。

(2) 冷等离子体是指低温等离子体中重粒子温度较低的等离子体。其等离子体的重粒子温度只有室温左右,而电子温度可达上万开(K)。冷等离子体内带电粒子没有通过充分的能量交换达到平衡,远离热力学平衡状态或局部热力学平衡状态。如在照明上的辉光放电产生的等离子体就属于冷等离子体。

等离子体的分类如图 1-11 所示,可以一目了然。

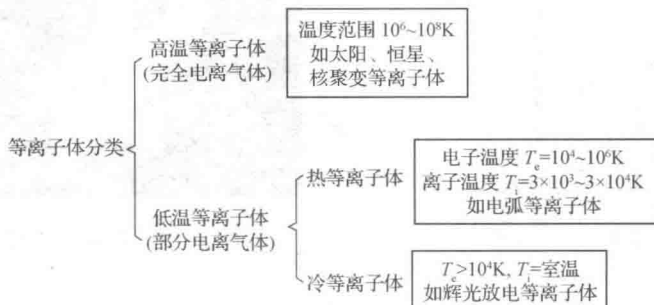


图 1-11 等离子体分类

^① 热力学平衡:系统各部分的宏观性质(如系统的温度、压力、体积、密度等)长时间不随时间而改变,则称该系统处于热力学平衡状态。

2. 按电离程度分类

等离子体按气体电离的程度分类,可分成完全电离气体、部分电离气体、弱电离气体等。完全电离气体中,几乎所有分子(或原子)都电离成电子和离子。部分电离气体中,部分分子(或原子)电离成电子和离子,其他为中性分子,实际上1%的电离度就可使等离子体的电导率接近完全电离时的电导率。弱电离气体中只有少量分子(或原子)电离。

3. 按粒子密度分类

按粒子密度分类,可分成致密等离子体和稀薄等离子体。

当粒子密度数大于每立方厘米 10^{18} 个时,就可称为致密等离子体或高压等离子体。由于粒子密度很高,这时粒子间的碰撞对能量的传递起主要作用。例如,压强在 0.1 个标准大气压以上的电弧,均可看作致密等离子体。

当粒子密度数小于每立方厘米 10^{12} 个时,粒子间碰撞基本不起作用,粒子间能量无法通过碰撞充分交换,这时称为稀薄等离子体或低压等离子体。例如,辉光放电就属于此类型。

4. 按产生途径分类

按产生途径分类,等离子体可分为自然等离子体和人工等离子体两大类。

5. 按所用气体的化学性质分类

按产生等离子体时应用的气体的化学性质不同,分为不活泼气体等离子体和活泼气体等离子体两类。不活泼气体如氩气(Ar)、氮气(N₂)、氟化氮(NF₃)、四氟化碳(CF₄)等。活泼气体如氧气(O₂)、氢气(H₂)等,活泼气体的等离子体具有更强的化学反应活性。

三、我的生成

我是怎么生成的?或者说等离子体是怎样产生的呢?各位看客,先不要急,让我娓娓道来。

产生等离子体的方法和途径是多种多样的,其中宇宙天体、星际空间中的等离子体和地球高空电离层属于自然界产生的等离子体,这里姑且不论。下面主要叙述人为产生的等离子体。

怎样才能人工产生等离子体呢?原则上,只要能提供足够的能量使气体的分子、原子产生电离即可,而且并不要求使所有的分子(原子)都电离成电子、离子。从外界获取的能

量可以是：电能（放电）、核能（裂变、聚变）、热能（火焰，即剧烈的氧化还原反应）、机械能（振动波）、辐射能（电磁辐射、高能粒子辐射）等。

人为产生等离子体最为方便的方法，也是较早应用的方法，即放电电离。人工产生等离子体并不是一件很难的事。一般气体放电，很少有百分之百气体分子电离的情况。实验上只要有 1% 的气体分子（或原子）电离，就可达到等离子体状态。

这里，关于电离可能要先说几句。

众所周知，物质由分子构成，分子由原子构成，原子由带正电的原子核和围绕它的、带负电的电子构成。物质的分子在一定的条件下，形成物质的各种聚集态。在日常生活里，大家都已司空见惯的是：给冰加热，冰会融化成水；给水加热，水又会汽化，成为水蒸气；再给水蒸气加热，它的温度就会不断升高。温度越高，分子的热运动越剧烈，当温度足够高的时候，构成分子的原子获得了很大的动能，分子也会破裂，构成分子的原子分离。当物质被加热到足够高的温度或其他原因时，原子中的外层电子摆脱原子核的束缚成为自由电子，就像下课后的学生跑到操场上随意玩耍一样。电子离开原子核，这个过程就叫作“电离”。这时，物质就变成了电子和离子的混合物，当然也可能包含中性粒子。在高度电离的气体中，正电荷和负电荷的总数相等，整个气体宏观上呈近似电中性状态，这种状态叫作等离子态，或者叫作等离子体，这就是我。（图 1-12）

由此可见，等离子体和普通气体的主要区别是：等离子体是导电的，而普通气体是不导电的；再就是普通气体的原子结构是完整的，而等离子体则是电子与原子核分离，并可能掺杂中性分子。乍看起来，这种区别似乎无关紧要。但且慢下结论，关系大得很呢！各位看客，往下看本书，便会知晓。

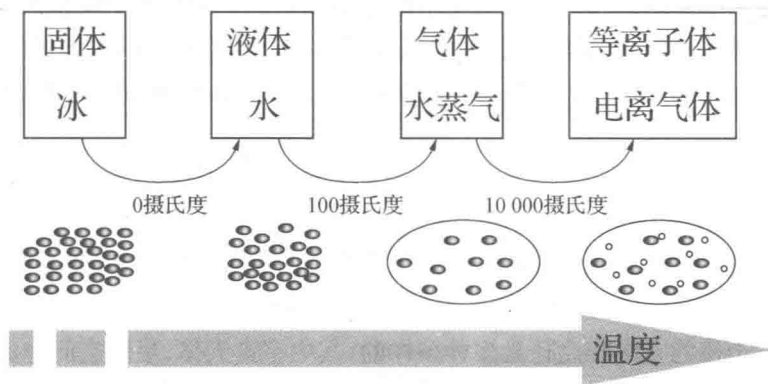


图 1-12 物质四种状态的有序程度变化

在实验室技术上可以用不同的方法产生电离，其中最重要的有：

(1) 热致电离；