



高等学校物理学小丛书

等 离 子 体 及 其 应 用

孙 杏 凡 编

高 等 教 育 出 版 社

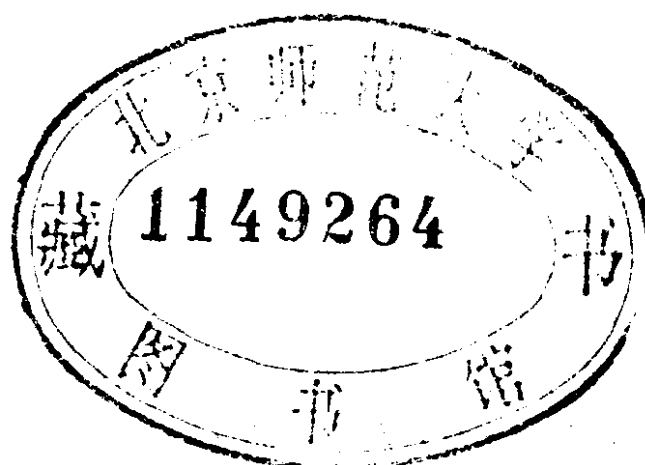
高等学校物理学小丛书

等离子体及其应用

孙杏凡 编

541/100/17

图书馆藏



高等教育出版社

本书是高等学校《物理学小丛书》中的一册，是为高等学校普通物理课教学需要而编写的参考读物。

本书以介绍等离子体的基本概念和基本理论及其应用技术的基本原理为主，不运用过于艰深的数学，也不涉及专业性过强的等离子理论，叙述深入浅出，可使读者得到一定的等离子体知识。本书可供高等院校师生和一般工程技术人员参考。

高等学校物理学小丛书

等离子体及其应用

孙杏凡 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

江苏海安印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 4.875 字数 110,000

1982年12月第1版 1983年8月第1次印刷

印数 00,001—6,500

书号 13010·0842 定价 0.63 元

序 言

大约从五十年代起，等离子体物理学的迅速发展及其在工程技术上的广泛应用，引起了人们极大的注意。现在，对一般工程技术人员和高等学校学生来说，具备一定的等离子体知识已很必要。本书可以说是为了这一目的而进行的一种尝试。

大家知道，固态、液态和气态构成了物质的三态，那么，等离子体就是物质的第四态。

简单地说，等离子体就是电离气体，它可以是部分或完全电离的。任何物质，只要加热到足够高的温度，均能电离而成为等离子体。很显然，组成等离子体的基本成分是正离子、自由电子和中性原子，因而，等离子体具有很好的导电性，并在宏观上保持电中性。

受控热核反应的研究是等离子体应用中最诱人的问题。因为人类目前的主要能源是煤和石油，而地球上煤和石油的蕴藏量是有限的，怎样才能解决人类在能源问题上的困境呢？现已确信，在太阳内部，等离子体的温度超过 10^7 开，在这样高的温度下，原子核间发生非常强烈的相互作用，以致产生热核反应，使氢变成氦，并且放出巨大的能量。正是这种被太阳发射的能量，直到目前还是我们取之不尽的能源。如果我们能“驯服”热核反应，使它在地球上在我们控制下进行，那么，人类就不必为能源问题而分心了。欲达到这一目的，首先要

解决的问题是：这种灼热的高温等离子体如何取得和怎样把它约束在一定的空间内，实现可控热核反应。对此，已有很多科学的方案，正处于实验室研究阶段，其中有的已取得了一定的进展，但离开问题的解决还相差甚远。就以等离子体的约束来说吧，显然不能把这种高温等离子体放在固体壁的“容器”里，因为任何材料的固体壁连短促的一刹那也不能支持，这犹如在冰做的容器里盛沸水一样不可能。于是人们采用磁场来约束等离子体，迫使等离子体的全部粒子按一定的队形运动，而不与固体壁接触。这本认为是可行的办法，谁知在约束的同时，出现了高温等离子体的激烈的不稳定性，以致没有办法约束到实现反应所需要的时间。现在，许多等离子体物理学家正在为解决这个问题而作出努力。应该看到，要解决这个问题，遇到的困难如此之大，至今，谁也无法提出近于解决这一困难的途径。

磁流体发电机是等离子体应用中又一引人注目的课题。它不需任何运动部件，而把热能直接转化为电能，使效率比原来的透平发电机大为提高。把这种发电机作一简单变换，即成为电动机（又称电磁泵），它可以把电能直接转化为机械能。还需要强调的是：在这种电气设备中，不是用金属作导体，而是用比金属轻千百万倍的等离子体。人们不难提出，能否把所有的电工材料由轻便的等离子体来替代笨重的金属呢？

随着等离子体在技术上应用的不断扩大，开辟了一个新的技术领域——等离子炬。现已有用于金属切割、熔焊和表面喷涂等工艺的等离子炬，用于化工、冶金等方面的等离子炬正在研制中。

等离子体还将在通讯、空间技术、电光源和医学等领域得到应用。可以看出,等离子体的应用有着相当广阔的前景。

等离子体物理在上述种种应用的推动下,在经典力学、电动力学和非相对论统计力学等学科的基础上得到很快的发展。

本书着重阐述等离子体的基本性质;用单粒子理论讨论等离子体的回旋运动、漂移运动和磁矩的不变性;用等离子体的流体模型讨论等离子体在磁场中的扩散和冻结效应、等离子体的平衡以及阿尔芬波;详细介绍冷等离子体中的低频波,以便对电磁波在等离子体中的传播特性有一定的了解;最后,分析讨论了等离子体的产生、磁约束装置和诊断技术,以及等离子体的应用。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,而以介绍等离子体的基本概念和基本理论及其应用技术的基本原理为主。

最后,要对中国科学院安徽分院等离子体研究所的同志和上海光机所范品忠同志表示感谢,他们审阅了本书的初稿,并提出了许多宝贵意见。同时,也切望读者对书中存在的错误和不到之处,随时提出批评意见。

编 者

一九八一年三月

目 录

序言	i
第一章 等离子体的基本性质	1
§ 1.1 什么是等离子体	1
§ 1.2 等离子体的主要特征量	4
§ 1.3 等离子体的导电性和介电性	14
§ 1.4 等离子体粒子间的碰撞	18
§ 1.5 等离子体“鞘”	21
第二章 等离子体单粒子理论	24
§ 2.1 带电粒子在稳恒磁场中的运动	24
§ 2.2 电漂移	27
§ 2.3 带电粒子在非均匀磁场中的漂移	30
§ 2.4 磁矩不变性	33
第三章 磁流体力学基础	36
§ 3.1 等离子体的流体模型	36
§ 3.2 流体力学方程	37
§ 3.3 麦克斯韦方程	39
§ 3.4 磁流体力学方程	41
§ 3.5 磁场的扩散和冻结效应	44
§ 3.6 等离子体在磁场中的平衡和平衡时的性质	48
§ 3.7 磁收缩效应 等离子体柱之平衡	51
§ 3.8 阿尔芬波	54
第四章 等离子体波	57
§ 4.1 波动的一般概念 色散关系	58
§ 4.2 冷等离子体中的电磁波	61

§ 4.3 热等离子体中的波	74
第五章 等离子体产生、辐射、诊断和磁约束装置	76
§ 5.1 等离子体中的元过程	76
§ 5.2 等离子体的产生	79
§ 5.3 等离子体辐射	90
§ 5.4 等离子体诊断	93
§ 5.5 等离子体磁约束装置	106
第六章 等离子体应用	119
§ 6.1 受控热核聚变反应	119
§ 6.2 磁流体发电	127
§ 6.3 用于金属切割、表面喷涂的等离子炬	133
§ 6.4 等离子体工业应用前景	138

第一章 等离子体的基本性质

§ 1.1 什么是等离子体

等离子体是由大量的自由电子和离子组成、且在整体上表现为近似电中性的电离气体。它与大家熟悉的物质三态(固态、液态和气态)一样,是物质存在的又一种聚集态。所以,人们又把等离子体称为物质第四态,或称为等离子态。

怎样使物质处于等离子态呢? 我们知道,在一定条件下,物质的各态之间可以互相转化;而物质的不同聚集态对应着物质粒子(原子、分子和离子)排列的不同有序程度。因此,实现物质各态间的转换,实际上是改变物质有序度的过程。例如,组成固体的粒子只能在晶格位置附近作热运动,使固体的有序度最高;但如从外界向固体供给能量,则当每个粒子的动能超过其结合能时,固体将转化为有序度较低的液体或直接转化为气体。同样,只要向液体供给能量,液体就能转化为气体。这就自然会提出这样一个问题,当我们继续向气体供给能量时,气体能否向新的物质状态转化呢? 人们从科学实验和生产斗争中认识到,只要使每个粒子中电子的动能超过原子的电离能时,电子将会脱离原子的束缚而成为自由电子,而原子则因失去电子而成为带正电的离子,这个过程称为电离。当气体中足够多的原子被电离后,这种电离的气体已不是原来的气体了,而转化成为新的物态——等离子态。显然等离

子体的有序度最差，这是因为电离使中性原子的有序度受到了破坏。在等离子体内，电子可以脱离原子而完全混乱的运动，就象普通气体中的分子运动一样。

从上面的分析可以看出，任何由中性粒子组成的普通气体，只要外界供给能量，使其温度升到足够高时，总可以成为等离子体。对同一种物质来说，处于等离子态时的温度要比处于固态、液态和气态时高。人们预料，随着科学的不断发展和实验手段的提高，等离子体还可能向有序度更差的物质第五态(未被命名)转化。在第五态中，物质将以物质-反物质对的形式出现。

实验表明，在普通气体中，即使只有 0.1% 的气体被电离，这种电离气体已具有了很好的等离子体性质。如果有 1% 的气体被电离，这时等离子体便成了电导率很大的理想导体。用于热核反应的高温等离子体，其原子几乎是完全电离的。

一般来说，组成等离子体粒子的基本成分是电子、离子和中性原子。在一次电离的情况下，带负电的粒子(电子)和带正电的粒子(离子)数目相等；在多重电离时，电子数可多于离子数。但是，不论在哪一种情况下，等离子体在宏观上仍保持电中性。

等离子体在性质上与普通气体有很大的差别。如普通气体中的粒子主要进行杂乱的热运动；而在等离子体内，除热运动外，还能产生等离子体振荡，特别在有外磁场存在的条件下，等离子体的运动将受到磁场的影响和支配，这是等离子体与普通气体的重要区别。在地球表面的空气里，由于宇宙射线的作用，平均每秒钟每立方厘米内形成大约 5 对离子；而在

标准状态下,每立方厘米内约有 10^{19} 个气体分子,可见空气的电离度是极为微小的。磁场对这种气体的运动不产生任何影响。从这方面来看磁场对电离气体是否有作用,也可作为判断等离子体的一种方法。但另一方面,由于等离子体在宏观上呈电中性,同时它又是气体,故一般气体定律及许多关系仍适用于等离子体。

在地球上,人们很熟悉的是固态、液态和气态。而对物质的等离子体状态比较陌生。这是因为地球表面温度太低,不具备等离子体产生的条件。不过在特定条件下,地球上亦能产生等离子体,如夏天的雷电就是空气被电离而产生的瞬时等离子体在发光;夜间霓虹灯鲜艳的色彩,就是氖或氩等离子体产生的;另外,在日光灯、火焰和氢弹爆炸中均存在着等离子体。

与地球上的情况完全相反,现已知道,在宇宙中约有百分之九十九点九以上的物质处于等离子体态。在恒星内部,电离由高温产生;在稀薄的星云和星际气体内,电离由恒星的紫外辐射引起。

在太阳系内,太阳就是一个灼热的等离子体火球。当出现太阳色球爆炸时,将发射出强大的等离子体云,这是以质子和电子组成的等离子体流。地球大气上层被太阳的辐射电离,而成电离层,这也是由等离子体组成。由此可见,等离子体是宇宙中物质存在的普遍形式。

最后,我们必须指出,把等离子体视为电离气体,其实并没有包括等离子体的全部。如电解质溶液,里面包含有能自由运动的正负离子,能导电,所以是等离子体。又如金属具有

固定在晶格中的正离子和能自由运动的电子，应该说是典型的固体等离子体。本书只讨论由电离气体组成的等离子体，不涉及其他类型的等离子体。

§ 1.2 等离子体的主要特征量

一、等离子体粒子密度

等离子体粒子密度表示单位体积(每立方米)中所含粒子数的多少。一般用 n_i 表示离子的密度、 n_e 表示电子的密度和用 n 表示两种异号电荷的粒子中任一种的密度。

设中性粒子密度为 n_0 ，则等离子体的电离度 $\alpha = \frac{n}{n_0}$ 。在充分电离的等离子体内，电离度趋于 1；在弱电离的等离子体内，电离度为一很小的分数。在热力学平衡条件下，电离度仅与等离子体密度和温度有关。

从粒子密度，我们可以估算出粒子间的平均距离。设

$$N = n_i + n_e,$$

显然 N 即为等离子体中带电粒子的总和。设想把等离子体中一个单位体积被分成 N 个小立方体，则每一个小立方体中平均有一个带电粒子，而小立方体的体积则为 $\frac{1}{N}$ ，所以，每个粒子间平均距离 d 可视为 $N^{-\frac{1}{3}}$ ，即 $d = N^{-\frac{1}{3}}$ 。

应该看到：组成等离子体的带电粒子间存在着库仑力的相互作用。由于库仑力的长程性，可知每一个等离子体粒子与大量其他粒子同时相互作用着，这实际上变成一个多体相互作用问题。可是当讨论等离子体平衡性质时，我们常把问题简化，把等离子体当作理想气体来处理。作这样近似处理

的物理本质是：认为带电粒子的库仑相互作用位能远远小于热运动的动能：

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 d} \ll kT$$

所以每个粒子几乎是自由的，上式叫做等离子体理想气体化条件。满足这个条件的等离子体可以看成是理想气体；它在平衡状态下的粒子分布，服从玻耳兹曼分布律。

表一列出了一些存在于自然界和实验室制得的等离子体粒子密度。可以看出，粒子的密度在很大的范围内变化。根据粒子密度，可将等离子体分为稠密等离子体和稀薄等离子体。如恒星灼热的高温使其成为等离子体，粒子数密度约 10^{28} — 10^{31} ；目前，人们采用高功率的激光束，以极高的速度加热而得到等离子体，其粒子密度高达 10^{26} — 10^{28} ；我们称这种等离子体为稠密等离子体。又如星际气体云内电子密度约在 10^3 和 10^6 之间；地球外层空间的电离层内，粒子密度约在 10^8 和 10^6 之间；它们都属于稀薄等离子体。

表一 几种等离子体的主要特征量

等离子体	$\lg n$	$\lg T_e$	$\lg \lambda_D$	$\lg f_p$
火 焰	14	3.5	-7	8.5
辉光放电	16	4.5	-7	9
电 离 层	12	3	-6	7
恒星内部	31	7.5	-15	17.5
实验室等离子体	19	7.5	-8	11

二、等离子体温度

温度是一个重要的热力学量.按照热力学理论,当物质的状态处于热平衡时,才能用一个确定的温度来描述.对等离子体来说,其热平衡的建立,是与粒子密度、电离度、温度和外界电磁场等因素有关,因此,等离子体一般不处于热平衡状态中,故要用温度来描述等离子体,是存在一定的困难,这将使温度成为一个不确切的状态参量.然而在科学研究和工程上,又必须经常注视等离子体的温度变化,因此,对等离子体温度有一个全面的认识是很必要的.

在非常稀薄的等离子体(如星际空间等离子体)内,粒子间要经过几天才相碰一次,能量交换很难进行,等离子体长期处于远离热平衡的状态.在这种情况下,温度本身就成为不确定的,只在某种假定意义下,才可以谈到温度.

在比较高的密度下,等离子体内可能出现局部热平衡状态.如日光灯点燃后,由于气体放电产生的等离子体,其电子温度可达数万度,而正离子温度却与室温相差不多,这表明等离子体两种不同的粒子成分,各自处于热平衡态中.这种局部热平衡状态的出现,是由于电子质量和离子质量相差很大,它们间的相互作用可视为完全弹性的,使之碰撞中不易进行能量的传递.又如,在有磁场作用的情况下,等离子体可出现两种温度:一是沿着磁场的纵向温度;二是垂直磁场的横向温度,使等离子体具有各向异性的性质.上述情况,人们称它为双温等离子体.

在浓密的等离子体内,粒子间的碰撞迅速增加;同时粒子间的平均距离变小,静电相互作用越来越明显,使等离子体各

成分间建立了热力学平衡, 这时, 等离子体才能用一个统一的温度来表征.

在热平衡状态下, 粒子遵从麦克斯韦分布. 假如粒子热能只与平动有关, 则粒子的平动动能等于 $\frac{3}{2}kT$, 即平衡的等离子体每个粒子的热能可表为:

$$E = \frac{3}{2}kT$$

为使用方便, 等离子体温度用能量单位——电子伏特 (eV)——作为测量单位. 用能量单位测量温度, 这时把温度的概念理解为描述粒子热运动能量的量 kT , k 为玻耳兹曼常数. 那么, 一个电子伏特的温度相当于开氏绝对温度多少度呢? 因为

$$1[\text{电子伏特}] = 1.602 \times 10^{-19}[\text{焦耳}],$$

$$k = 1.380 \times 10^{-23}[\text{焦耳} \cdot \text{开}^{-1}],$$

根据以上所述, 我们有: $1[\text{电子伏特}] = kT$, 可得

$$T = \frac{1.60 \times 10^{-12}}{1.38 \times 10^{-16}} = 11600 [\text{开}]$$

根据计算表明: 实现热核聚变反应达到点火温度 $T \sim 10^7 - 10^8$ 开, 则可表为 5—10 千电子伏, 我们把它称为高温等离子体. 用于磁流体发电的等离子体约有 $10^3 - 10^4$ 开, 即 0.1—1 电子伏特, 我们把它称为低温等离子体. 显然, 对等离子体来说, 高温和低温的范围与我们日常的温度高低是完全不同的. 表一也列出了几种等离子体的温度.

三、等离子体频率

等离子体频率是指等离子体的一种电子的集体振荡频

率, 频率的大小表示了等离子体对电中性破坏反应的快慢.

我们设想在无界的等离子体中, 由于某种扰动, 在图 1-1 所示的局部区域内出现了电子的过剩; 或者说, 在此局部区域内电中性受到了破坏, 等离子体偏离了平衡态. 显然这些过剩的电子产生一个电场 (电力线如图所示), 电子间的静电斥

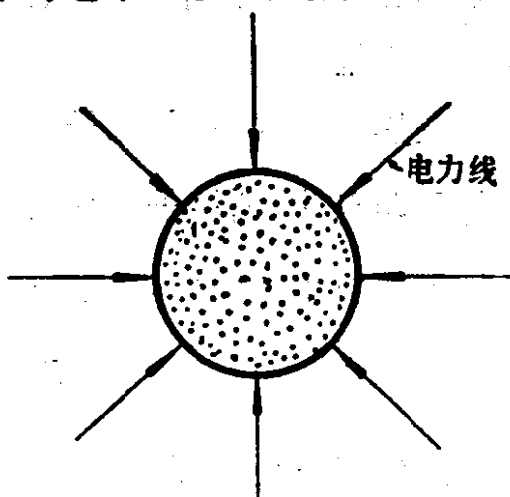


图 1-1 电子的集体振荡

力, 迫使电子从这区域向外运动, 过剩很快消失. 但是运动所具有的动能使电子不能在恢复到电中性时就停下来, 由于惯性使离开这一区域的电子过多, 反而出现了正离子的过剩 (其产生的电场之电力线, 与图示方向相反), 一个反向的电场又把外面的电子拉回来, 电子的过剩又将出现. 这样由于相当数量的电子的集体运动, 而形成等离子体内部电子的集体振荡.

从能量的观点来看, 在振荡过程中, 不断进行着粒子热运动动能和静电位能的转换, 最后将由于碰撞阻尼或其他形式的阻尼而把能量耗散, 使振荡终止.

现在我们来决定集体振荡的频率. 设等离子体密度为 n , 由于小扰动而引起的振荡电场的形式为 $E = E_0 e^{i\omega \cdot t}$, 电子在电场中的运动方程

$$m_e \frac{dv}{dt} = e E_0 e^{i\omega \cdot t}$$

积分后得

$$v = \frac{eE_0}{i\omega_e m_e} e^{i\omega_e t}$$

如忽略离子电流, 则等离子体中总的净电流密度

$$j = nev = \frac{ne^2 E_0}{i\omega_e m_e} e^{i\omega_e t}$$

这里我们假定磁场 $B=0$, 则把上式代入麦克斯韦方程

$$\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + j = 0$$

即得

$$\left(i\omega_e + \frac{ne^2}{i\epsilon_0 \omega_e m_e}\right) E_0 e^{i\omega_e t} = 0$$

要使上式等于零, 那必须

$$i\omega_e + \frac{ne^2}{i\epsilon_0 \omega_e m_e} = 0$$

将上式乘以 i , 即得

$$\omega_e^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e}$$

我们用 ω_{pe} 表示电子振荡角频率, 则

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1-1)$$

上面的讨论只涉及等离子体电子的振荡, 在实际等离子体内, 可以用类似的方法去讨论离子振荡. 其离子振荡角频率, 参照式(1-1)得出:

$$\omega_{pi} = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m_i}}$$

其中 m_i 为离子质量. 由于 $m_i \gg m_e$, 所以

$$\omega_{pi} \ll \omega_{pe}$$